

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

Technologie tváření ložiskových kroužků

Forming Technology of Bearing Ring

Student:

Ondřej Vican

Vedoucí bakalářské práce:

prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.

Ostrava 2012

## Zadání bakalářské práce

Student: **Ondřej Vican**  
Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie  
Téma: **Technologie tváření ložiskových kroužků**  
**Forming Technology of Bearing Ring**

Zásady pro vypracování:

1. Rozbor technologií výroby ložiskových kroužků.
2. Návrh technologie přesného tváření polotovarů ložiskových kroužků.
3. Konstrukční a technologický rozbor navržené technologie tváření.
4. Technicko-ekonomické posouzení navržené výrobní technologie.

Seznam doporučené odborné literatury:

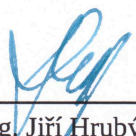
HENZEL, A., SPITTEL, T. *Rasčet energosilovych parametrov v processach obrabotki metallov davleniem*. Moskva: METALLURGIA, 1982. s. 73  
BÁLEK, S. *Tepelně technické tabulky a diagramy*. Ostrava: VŠB, 1979, 137 s.  
PETRUŽELKA, J. aj. *Metoda konečných prvků ve tváření za tepla*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 1998, ISBN 80-7078-636-1.  
AVITZUR, B. *Handbook of Metal-Forming Processes*. New York: John Wiley and Sons, 1983  
SEMIATIN, S. L. a kol. *ASM Handbook First Edition. Vol. 14A, Metalworking: Bulk Forming*. Ohio, Metals Park: ASM International, 2005

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

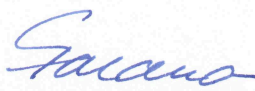
Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.**

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012

  
prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.  
vedoucí katedry

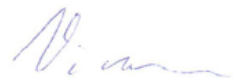


  
prof. Ing. Radim Farana, CSc.  
děkan fakulty

### Místopřísežné prohlášení

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 20. 5. 2012

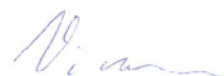


.....  
podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 školní dílo.
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі́, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 20. 5. 2012



.....  
Podpis

Jméno a příjmení autora práce: Ondřej Vican

Adresa trvalého pobytu autora práce: Albrechtice 114, 563 01 Lanškroun

**ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE:**

VICAN, O. *Technologie tváření ložiskových kroužků: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB-Technická universita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2012, ?? str. Vedoucí práce prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.

Tato práce pojednává o technologii tváření ložiskových kroužků. Klade si za cíl navrhnout alternativní tvářecí proces v podobě převrácení kroužku na trnu za tepla. Návrh se zaměřuje na snížení objemu odpadního materiálu, práce, tvářecí síly a následného třískového obrábění. Analýza tvářecího procesu byla řešena jako simulace v programu Qform. Jako předloha bylo použito kuželíkové ložisko Ød80 mm, ØD 125mm (32016 - x z katalogu firmy INA). Získané parametry tváření slouží k porovnání s ostatními technologiemi a technicko-ekonomickému zhodnocení.

**ANNOTATION OF BACHELOR THESIS:**

VICAN, O. *Forming technology of bearing ring: Bachelor's thesis*, Ostrava: VŠB-Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology, 2012, ?? pp., Thesis supervisor: prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.

This thesis discusses the forming technology of bearing rings. It aims to propose an alternative forming process of hot ring rollover on the former. The design focuses on reducing the volume of waste material, work, load, and subsequent machining. Analysis of this forming process has been solved as a simulation in the program Qform (ver.5.1.1.). Tempered roller bearing Ød80 mm, ØD 125mm (32016-x from catalogue of the company INA) has been used as a model. Acquired parameters are used to compare with other technologies and for technical-economical evaluation.

## Obsah

<b>SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ A ZKRATEK.....</b>	<b>- 6 -</b>
<b>1 ÚVOD: .....</b>	<b>- 8 -</b>
<b>2 TECHNOLOGIE TVÁŘENÍ MATERIÁLU ZA TEPLA.....</b>	<b>- 9 -</b>
2.1 Vliv tváření na vlastnosti a změnu struktury materiálu .....	- 9 -
2.1.2 Základní zákonitosti objemového tváření .....	- 9 -
2.2 Mechanizmy plastické deformace .....	- 11 -
2.3 Základní typy plastické deformace .....	- 11 -
2.3.1 Křivka zpevnění .....	- 13 -
2.3.2 Vliv napjatosti na plastickou deformaci .....	- 13 -
2.3.3 Vliv rychlosti na plastickou deformaci .....	- 14 -
2.4 Tváření za tepla.....	- 14 -
2.4.1. Druhy rekystalizace .....	- 15 -
2.4.2 Tvářecí teplota.....	- 15 -
<b>3 VALIVÁ ULOŽENÍ (VALIVÁ LOŽISKA).....</b>	<b>- 18 -</b>
<b>4 ROZBOR TECHNOLOGIE VÝROBY LOŽISKOVÝCH KROUŽKŮ .....</b>	<b>- 21 -</b>
4.1 Výroba ložiskových kroužků klasickým třískovým obráběním.....	- 21 -
4.2 Tváření ložiskových kroužků na 2 operace z dlouhé tyče.....	- 21 -
4.3 Axiálně-radiální válcování kroužků za tepla.....	- 23 -
4.4 Tváření kroužků převrácením na trnu za tepla.....	- 27 -
4.5 Technické požadavky na tvářené kroužky .....	- 29 -
<b>5 NÁVRH TECHNOLOGIE PŘESNÉHO TVÁŘENÍ POLOTOVARU LOŽISKOVÝCH KROUŽKU.....</b>	<b>- 30 -</b>
5.1 Výběr a sled potřebných operací.....	- 30 -
5.1.1 Pěchování za tepla.....	- 30 -
5.1.2 Prostřihování.....	- 30 -
5.1.3 Tvarování obvodové dráhy .....	- 32 -
5.1.4 Otáčení pomocí trnu .....	- 32 -
5.3 Výpočet objemu výkovku a rozměry polotovarů.....	- 33 -
5.4 Výkres výkovku.....	- 33 -
5.5 Výpočet tvářecích parametrů .....	- 34 -
<b>6 KONSTRUKČNÍ A TECHNOLOGICKÝ ROZBOR NAVRŽENÉ TECHNOLOGIE TVÁŘENÍ.....</b>	<b>- 38 -</b>
6.1 Volba tvářecího stroje .....	- 38 -
6.2 Použité materiály, jejich chemické a mechanické vlastnosti .....	- 40 -
6.3 Metody predikce tvářecích parametrů v programu Qform 2D/3D .....	- 42 -
<b>7 TECHNICKO-EKONOMICKÉ POSOUZENÍ NAVRŽENÉ VÝROBNÍ TECHNOLOGIE .....</b>	<b>- 43 -</b>
<b>8. DISKUZE DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ:.....</b>	<b>- 44 -</b>
<b>POUŽITÉ ZDROJE .....</b>	<b>- 45 -</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH: .....</b>	<b>- 47 -</b>

## Seznam použitého značení a zkratk

Značka	Popis	Jednotka
$\tau_{kr}$	kritické smykové napětí	[MPa]
$A_{1,2}$	deformační práce tělesa	[J]
$a$	lineární rozměry tělesa	[mm]
$V_{1,2}$	objem tělesa před a po operaci	[mm <sup>3</sup> ]
$F_t$	tečná síla	[N]
$S_{kr}$	plocha průřezu skloněná o úhel $\alpha$	[mm <sup>2</sup> ]
$R_e$	mez kluzu	[MPa]
$R_{eU}$	horní mez kluzu	[MPa]
$R_{eL}$	dolní mez kluzu	[MPa]
$\sigma$	napětí	[MPa]
$v_d$	poměrná rychlost tváření	[s <sup>-1</sup> ]
$\varepsilon$	poměrná deformace	[-]
$\dot{\varepsilon}$	rychlost deformace	[s <sup>-1</sup> ]
$h$	výška zdvihu	[mm]
$T_{tav}$	teplota tavení	[°C]
$T_0$	výchozí teplota materiálu	[°C]
$T_1$	teplota zápustek	[°C]
$T$	střední okamžitá teplota	[°C]
$\lambda$	koeficient přestupu tepla	[W/m · K]
$\rho$	hustota	[kg · m <sup>-3</sup> ]
$C$	měrné teplo	[J/kg · K]
$\delta$	tloušťka materiálu mezi zápustkami	[mm]
$T_d$	deformační teplo	[°C]
$\sigma_0$	střední hodnota napětí na intervalu $\langle 0, \varepsilon \rangle$	[MPa]
$\alpha$	část pohlcené energie	[-]
$J$	mechanický ekvivalent tepla (pro jednotky SI J=1)	[-]
$T_f$	teplo vzniklé třením	[°C]

$f$	součinitel tření	[-]
$p$	normálový tlak v kontaktní ploše	[MPa]
$S_k$	kontaktní plocha	[mm <sup>2</sup> ]
$T_k$	průměrná teplota za čas	[°C]
$b$	tloušťka stěny kroužku	[mm]
$h_k$	výška stěny kroužku	[mm]
$\varnothing D$	vnější průměr kroužku	[mm]
$\varnothing d$	vnitřní průměr kroužku	[mm]
$F_p$	přítlačná síla	[MN]
$\sigma_n$	normálová složka napětí	[MPa]
$F_s$	střížná síla	[MN]
$F_v$	protisíla vyhazovače	[MN]
$F_f$	výslednice třecích sil	[MN]
$t$	tloušťka blány	[mm]
$h_p$	hloubka proniknutí stříhadel	[mm]
$l_s$	délka střížné hrany	[mm]
$E$	Youngův modul pružnosti	[MPa]
$\kappa$	Poissonova konstanta	[-]



## 1 Úvod:

Tato bakalářská práce pojednává o alternativních možnostech výroby ložiskových kroužků za tepla, především však o technologii otáčení kroužku na trnu. Úkolem je rozbor technologie výroby ložiskových kroužků, návrh technologie přesného tváření polotovaru, konstrukční a technologický rozbor a technicko-ekonomické posouzení technologie. Pro srovnání, a k širšímu náhledu do problematiky, jsou uvedeny v současnosti využívané technologie tváření kroužků. Jedná se především o válcování kroužků na axiálně-radiálním válcovacím stroji, ale také o technologii zápustkového kování a třískového obrábění.

Objemové tváření v posledních letech zaznamenalo významný vzestup, což nám dává možnost zkoumat dříve z finančních důvodů neperspektivní alternativní technologie. Hlavní zásluhu na tom má vývoj výpočetní techniky a systémů numerického modelování plastického toku materiálu, které jsou založeny na metodě konečných prvků (MKP). V našem případě byl k řešení tvářecích operací použit systém **QForm 2D/3D** ve verzi 5.1.1 firmy QuantorForm. Jako materiál nástrojů byla zvolena tepelně odolná nástrojová ocel ČSN **19 733** a na výkovky byla použita ocel ČSN **14 109**, určená na ložiskové kroužky a valivé elementy. Jako předloha geometrie hotového kroužku byl použit vnější kroužek kuželíkového ložiska s klecí z katalogu firmy **INA/FAG 32016 – x**. Výpočet byl zaměřen na řešení teplotních závislostí, deformace, rychlosti deformace a napětí. Deformace materiálu je v programu uvažována jako visko-plastická tzn., že nejsou zohledněny elastické deformace.

Stěžejní částí technologického návrhu je výpočet tvářecích parametrů a návrh reprodukovatelného procesu. Tyto parametry jsou nutné ke konstrukci zápustek, výběr tvářecích operací a výběr vhodného stroje. Stanovili jsme 3 operace: pěchování, prostřihování a otáčení na trnu. Operace pěchování byla uvažována jako kování na jeden zdvih v otevřené zápustce s výronkovým můstkem. Úloha prostřihování nemohla být simulována, proto je nahrazena analytickým výpočtem. Hlavní myšlenkou je optimalizovat polotovar pro úspěšné otočení a současně snížit objem odpadního materiálu a velikost silového namáhání. Pro naše účely jsem zvolil hydraulický lis **ŽĐAS CTH 630** (jmenovitá rychlost 0,2 m/s, jmenovité zatížení 6,3 MN).

## 2 Technologie tváření materiálu za tepla

### 2.1 Vliv tváření na vlastnosti a změnu struktury materiálu

Tváření je technologický proces, při kterém se přemění jednoduchý polotovár na předkovek pro následnou technologickou operaci nebo na hotový obrobek předem definovaných rozměrů, tvarů, vzhledu, vlastností a tolerancí. Změna tvaru je zprostředkována velkými plastickými deformacemi, které nastanou po překročení meze kluzu. Energie potřebná ke změně struktury a tvaru vstupuje do procesu v podobě vnějších sil distribuovaných tvářecími nástroji a v podobě tepla. Hlavním znakem plastické deformace je její nevratnost.

Z technologického hlediska se tváření obvykle dělí na tváření za tepla a tváření za studena. V této práci se budeme zabývat tvářením za tepla. Výhody tváření za tepla jsou: nízké přetvárné odpory materiálu, snížené silové namáhání nástrojů, méně nákladné zařízení s menším jmenovitým zatížením a nižší jmenovitou rychlostí beranu, nižší spotřeba energie. Je ale také spojeno s problémy jako je mazání, oxidace materiálu (a s tím spjatá kvalita povrchu), širší tolerance, cyklické tepelné namáhání snižující životnost nástrojů, absence zpevnění a nižší úroveň homogenizace vlastností a struktury materiálu než při tváření za studena.[2][3]

#### 2.1.2 Základní zákonitosti objemového tváření

##### **Zákon stálosti objemu**

Objem polotovaru před tvářecí operací je roven objemu po deformaci. Součet logaritmických deformací je roven nule.[1]

##### **Zákon nejmenšího odporu**

Praktický význam zákona tečení nekonečně malého elementu materiálu je nejen v předpovědi směru tečení, ale díky zvýšení odporu v místě můstku výronkové drážky i v zaplnění zápustky.[1]

##### **Zákon závislosti deformace na napět'ovém stavu**

*„Průběh plastické deformace je přímo závislý na napět'ovém stavu.“*[1]

##### **Zákon stálosti potenciální energie na změně stavu (H.M.H.)**

*„Měrná potenciální energie potřebná na změnu tvaru, která je obsažená v deformovaném tělese při plastické deformaci, závisí na podmínkách plastické deformace (rychlost, stupeň deformace a teplota) a na materiálu ale nezávisí na stavu napjatosti.“*[1]

H.M.H., neboli energetická podmínka plasticity, je alternativně k maximálnímu smykovému napětí definována z oktaedrického smykového napětí a z pružné energie napjatosti změny tvaru.[1]

### **Zákon smykových napětí**

*„K plastické deformaci ve tvářeném tělese dojde tehdy, když smykové napětí v něm vznikající působením vnějších sil dosáhne určité hodnoty (kritické smykové napětí), která je závislá na materiálu a podmínkách plastické deformace (teplotě, stupni a rychlosti deformace, schématu hlavních napětí).“[1]*

Napěťový stav se zjišťuje v plasticky deformovaném válci zatíženém dvouosým stavem napjatosti. Deformace nastane, jakmile smykové napětí dosáhne kritické hodnoty. [1]

### **Zákon pružného odlehčení**

Pokud v tělese neprobíhá při procesu odlehčení a opětovného zatížení zotavení nebo stárnutí struktury, řídí se Hookovým zákonem. Pružná deformace má za následek, že po ukončení plastické deformace a odlehčení se změní rozměry výlisku, resp. kontura se zvětší o hodnotu pružné deformace. Při tváření za tepla probíhají procesy zotavení struktury, nedochází tedy ke zpevnění, a tím pádem ani k odlehčení.[1]

### **Zákon zpevnění**

V podmínkách tváření za tepla s úplným odpevněním dochází jen k zanedbatelně malému zpevnění.[1]

### **Zákon tření**

Na styčných plochách mezi nástrojem a tvářeným materiálem vzniká aktivní (žádoucí) nebo pasivní (nežádoucí) tření, které je definováno Coulombovým zákonem. Ve většině případů se snažíme pasivní tření minimalizovat pomocí různých maziv.[1]

### **Zákon přídavných napětí**

Přídavná napětí vznikají vlivem nerovnoměrnosti deformací při tváření. Jednotlivé vrstvy, zrna nebo elementární části krystalu nemohou měnit své rozměry, aniž by nepůsobily na své okolí. Tento jev se projeví jako vznik vyrovnávajících (přídavných) napětí, která nelze zahrnout do okrajových podmínek ani do rovnic rovnováhy. Vlivem přídavných napětí se zvětšuje deformační odpor materiálu, mění se schémata hlavních napětí a může se porušit celistvost materiálu vznikem mikro a makro trhlin. Přídavná napětí mohou zůstat v tělese i po skončení

deformace (snížení další tvárnosti, pokles chemické odolnosti a deformaci hotového výrobku). [1]

### **Zákon podobnosti**

Matematické vyjádření:

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{V_1}{V_2} = a^3 \quad (1)[1]$$

,kde je  $A_1$  ... deformační práce u prvního tělesa,  $A_2$  ... deformační práce u druhého tělesa,  $V_1$  ... objem prvního tělesa,  $V_2$  ... objem druhého tělesa,  $a$  ... lineární rozměry tělesa. [1]

## **2.2 Mechanizmy plastické deformace**

Kovy se vyskytují v podobě polykrystalických látek. Jejich struktura je tvořena různými krystaly polyedrického tvaru v metalografii nazývaná „zrna“. Při tuhnutí kovu vzniká velké množství krystalizačních center, která jsou náhodně orientována. Po určité době je krystalizace jednotlivých zrn omezena růstem jiných, čímž vzniká mozaiková struktura polykrystalického kovu, která se skládá z malých krystalových bloků (subzrn). Úhel krystalografických os krystalů jednotlivých subzrn kolísá v rozmezí několika úhlových vteřin vůči průměrné poloze osy celého krystalu.

Typy plastické deformace:

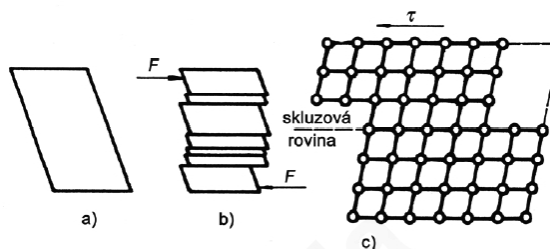
- Deformace na hranicích bloků: vyznačuje se kluzem na krystalových rovinách bloků, vznikem textur (prodlužováním zrn ve směru převládající deformace); pokud se neporuší soudržnost na hranicích bloků, lze dosáhnout velké plastické deformace.
- Deformace na hranicích zrn: soudržnost hranic zrn (krystalů) se už po menších deformacích narušuje a materiál se stává křehkým.

## **2.3 Základní typy plastické deformace**

*Deformace kluzem:* kluz je definován rovinou kluzu a směrem kluzu (zpravidla to bývají roviny nejhustěji obsazeny atomy), velikost posuvu je celočíselným násobkem nejmenší meziatomové mřížkové vzdálenosti.

**Jednoduchý:** vzniká v počáteční fázi plastické deformace a systém kluzových čar je orientován stejným směrem (bez ohybu nebo zakrucování rovin kluzu, krystalová mřížka bez poruch, malé zpevnění tvářeného materiálu).

**Složený:** vzniká až při dalším zatěžování ve stejném směru, pak v průřezu probíhá mnoho systému kluzu (roviny kluzu se natáčejí, zvyšuje se deformační odpor, dochází ke zpevnění, krystalická mřížka se štěpí a dochází k mikroskopickým trhlinám). [1]

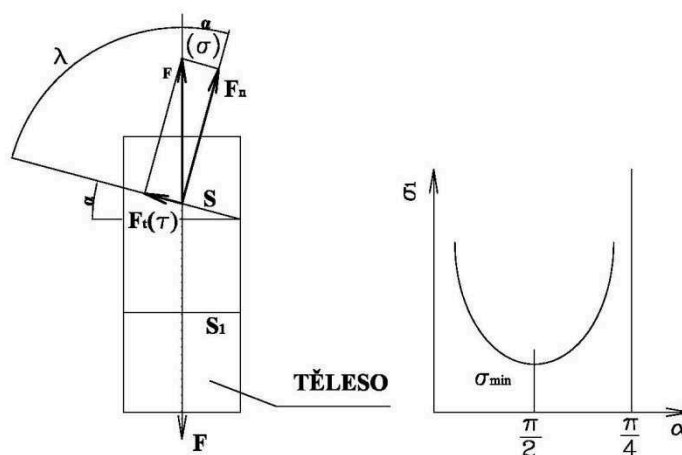


Obr. 1 Plastická deformace kluzem – a) jednoduchý kluz, b) složený kluz, c) skluzová rovina,  $\tau$  – směr kluzu[1]

Kritické smykové napětí (viz Obr. č. 2) je minimální smykové napětí potřebné k vyvolání kluzu v určité rovině. Zpravidla se značí  $\tau_{kr}$ .

$$\tau_{kr} = \frac{F_t}{S_{kr}} \text{ (MPa)} \quad (2)$$

$F_t$  ... tečná síla (N),  $S_{kr}$  ... plocha průřezu tělesa skloněná vůči ose tělesa o úhel  $\alpha$  ( $\text{mm}^2$ )



Obr. 2 Kritické smykové napětí [1]

Ze silového trojúhelníku na obrázku (viz obr. 2) odvodíme vztah pro osové napětí a z grafu vyčteme závislost  $\sigma$  na úhlu  $\alpha$ :  $\sigma_{min} \Leftrightarrow \alpha = \frac{\pi}{4} = 2\tau_{KR} = R_e$

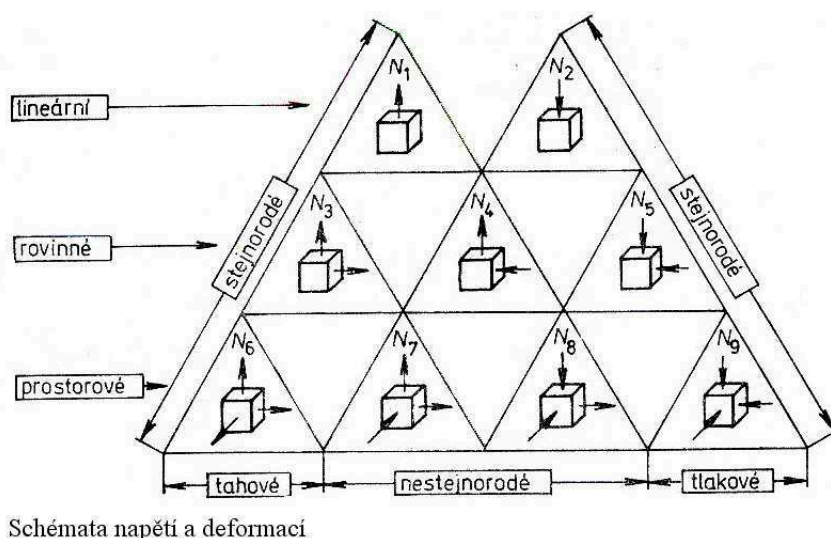
**Dvojčatění:** je druhým důležitým mechanismem deformace. Při dvojčatění dochází k procesu, při kterém se podél roviny vytváří zrcadlově souměrný obraz krystalografické mřížky. U dvojčatění se atomy pohybují na menší vzdálenosti, než jsou mezikrystalické vzdálenosti. Na rozdíl od kluzu se kolem roviny dvojčatění mění orientace krystalů a deformace se účastní všechny roviny.[1]

*Difuze:* pro její vznik existují dvě podmínky - vysoká teplota a velmi malá deformační rychlost. Principem difuze je přemísťování atomů vlivem vnějších napětí do míst s výhodnějšími energetickými podmínkami. K tomuto principu dochází dvěma způsoby - difuzí vakantních míst a difuzí mezi-uzlových atomů. Zásadní vliv na difuzní pohyb mají teplota, napětí při deformaci a koncentrace vakantních míst a intersticiálních atomů.[1]

### 2.3.1 Křivka zpevnění

Zjišťuje se pomocí tahové zkoušky. První část je přímková a vázána Hookovým zákonem pro pružné deformace. První část končí na mezi pružnosti materiálu ( $R_e$ ). Dislokace vázané na vměstky obsažené ve struktuře způsobí zvýšené napětí potřebné k jejich odtržení. Tento jev se označuje jako horní mez kluzu ( $R_{eU}$ ). Pohyb uvolněných dislokací potřebuje k pohybu nižší napětí, což se v tahové křivce projeví poklesem napětí na dolní mez kluzu ( $R_{eL}$ ).[1]

### 2.3.2 Vliv napjatosti na plastickou deformaci

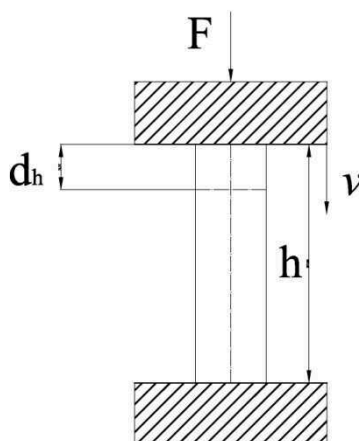


Schématu napětí a deformaci

Obr. 3 Schéma stavů napjatosti [2]

Obecně lze říci, že tvárnost materiálu je vyšší, čím výrazněji převládají tlaková napětí. Lze tedy tvářet většími tlaky a vyššími rychlostmi deformace. Veškeré stavy napjatosti lze také zobrazit pomocí Mohrových kružnic pro napětí. Následně je pak možné spočítat výslednici napětí a napětí ve směrech os souřadného systému[2]

### 2.3.3 Vliv rychlosti na plastickou deformaci



Obr. 4 Vzorek pro stanovení deformační rychlosti[1]

Deformační rychlost (poměrná rychlost tváření)  $v_d$ : je rychlost, kterou se při tváření přibližují počáteční a výsledná kontura. Je funkcí změny poměrné deformace za jednotku času.

$$v_d = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{dh}{h \cdot dt} = \frac{dh}{dt} \cdot \frac{1}{h} = \frac{v}{h} \text{ (s}^{-1}\text{)} \quad (1)[1]$$

Kde:  $\varepsilon$  ... poměrné deformace (-),  $t$  ... čas (s),  $h$  ... výška válcového polotovaru,  $v$  ... rychlost tvářecího nástroje např. beranu ( $\text{ms}^{-1}$ ).

*Tepelný efekt:* s růstem deformační rychlosti (dále jen  $v_d$ ) je spojen růst napětí a tvářecích sil potřebných pro tváření materiálu. To je doprovázeno zvýšením teploty tvářeného materiálu a částečným zlepšením jeho tváritelnosti. Pokud je však překročena kritická teplota, může dojít ke křehkému lomu. Efekt zvýšení  $v_d$  je tím výraznější, čím menší je pevnost materiálu. Při dynamickém zatížení se horní mez kluzu projeví výrazným zvýšením napětí.

### 2.4 Tváření za tepla

- realizuje se v širokém rozsahu teplot  $T$  a rychlostí deformace  $\dot{\varepsilon}$ .

*Tváření za zvýšených teplot (warm):*

$(0.4 - 0.6) \cdot T_{\text{tav}}$  - tzn. za zvýšené teploty, ale pod teplotou rekystalizace, používá se při superplastickém a isothermickém tváření. Rychlosti deformací se pohybují v rozmezí ( $\dot{\varepsilon} = 1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-4} [\text{s}^{-1}]$ ) [1]

*Tváření za vysokých teplot (hot):*

$(0.6 - 0.8) \cdot T_{\text{tavení}}$  - tzn., že nad teplotou rekrystalizace se dosahuje rychlosti deformace  $\dot{\epsilon} = 0,5 - 500[\text{s}^{-1}]$ . Odpevňovací mechanismy probíhají současně s deformací. Zpevnění a deformační textura je rychle nahrazena rekrystalizovanou strukturou. Tím je zajištěn nízký přetvárný odpor. [1]

Tváření za tepla definujeme jako tváření za takových teplot a rychlostí deformace, při kterých „uzdravovací“ procesy rekrystalizace udržují materiál ve změkčeném neboli odpevněném stavu, tzn. je zvýšena plasticita a přetvárné odpory mají nízké hodnoty. To umožňují procesy dynamického zotavení a dynamické rekrystalizace. Tváření za tepla se často řadí za slévání, kdy je žádoucí snížení chemické nehomogenity slévaného materiálu, zjemnění struktury materiálu, zavaření vnitřních necelistvostí, zvýšení houževnatosti a tvářitelnosti materiálu. [1][2]

Dosažení homogenity struktury materiálů srovnatelné s tvářením za studena není možné, protože deformace za tepla je na okraji výkovku intenzivnější a ochlazování rychlejší než uprostřed průřezu. V okrajových oblastech se tedy zachová jemnější struktura, zatímco uvnitř při pomalejším ochlazování z vyšších teplot se vytvoří zrna hrubší. Funkce teploty, rychlosti deformace a tlaku ohraničují oblast použitelných tvářecích operací. Přetvárný odpor závislý na teplotě pak přímo ovlivňuje stupeň deformace, jakou lze materiál za dané teploty a tlaku tvářet. S rychlostí deformace stoupá přetvárný odpor a zvětšuje se teplotní přírůstek vznikající jako deformační teplo. Teplota, jakou lze tvářet, se teoreticky blíží solidu, prakticky je však omezena oblastí vzniku trhlin za horka. [1][2]

#### **2.4.1. Druhy rekrystalizace**

1. *Statická* – probíhá až po skončení plastické deformace, deformační rychlosti jsou menší než rychlosti rekrystalizace.
2. *Dynamická* – probíhá za procesu plastické deformace v okamžicích poklesu napětí nutných pro její chod, deformační rychlosti jsou menší než rychlosti rekrystalizace.
3. *Smíšená* - deformační rychlosti jsou lehce menší nebo větší než rychlosti rekrystalizace.

#### **2.4.2 Tvářecí teplota**

*Okamžitá teplota tváření* závisí na výchozí teplotě polotovaru a nástrojů, deformačním teple vznikajícím při tváření, třecím teple vznikajícím na styčných plochách nástroj – polotovar, a na přenosu tepla z materiálu do nástrojů a do okolí.



*Minimální tvářecí teplota* je teplota, pod kterou se nesmí polotovar ochladit v průběhu tvářecích operací. Je to také teplota, při které ještě rychlost rekrystalizace vyruší vlivy zpevnění vyvolané plastickou deformací. Pro kov daného složení bude spodní tvářecí teplota závislá na velikosti deformace v daný čas a za dané teploty, rychlosti deformace a rychlosti ochlazování. S rostoucím stupněm deformace se zrychluje rekrystalizace, tím pádem se snižuje hodnota minimální tvářecí teploty.

*Maximální tvářecí teplota* je omezena především teplotou tavení a teplotou intenzivního opalu povrchu. Jedním z faktorů, které ovlivňují rozsah tvářitelnosti materiálu, je teplota tavení fází segregujících na hranicích zrn, zejména sulfidů a komplexních oxidů.

Pro dosažení jemnozrnné struktury je žádoucí vyvinout v poslední zařazené tvářecí operaci vyšší deformace a teplotu udržovat těsně nad minimální tvářecí teplotou.

#### Změna teploty materiálu v kontaktu materiál nástroj:

Polotovar budeme považovat za tenkou plochou desku a pro zjednodušení zanedbáme gradient teploty, tzn. rozdíl teplot uprostřed materiálu a na jeho povrchu. Původní teplotu materiálu definujeme jako  $T_0$ , teplotu zápustek jako  $T_1$ . Střední okamžitá teplota materiálu  $T$  v kontaktní ploše je pak rovna:

$$T = T_1 + (T_0 - T_1) \exp\left(\frac{-ht}{\rho c \delta}\right), \quad (5)$$

Kde je:  $\lambda$  ... koeficient přestupu tepla mezi materiálem a zápustkou,  $\rho$  ... hustota,  $C$  ... měrné teplo,  $\delta$  ... tloušťka materiálu mezi zápustkami

#### Deformační teplo:

Při tvářecích operacích se 95% - 98% energie přemění na teplo. Měrná deformační práce je pak definována jako plocha pod křivkou závislosti  $\sigma - \varepsilon$  (napětí – deformace). Zvýšení teploty materiálu vypočítáme jako:

$$\Delta T_d = \frac{\alpha \int \bar{\sigma} d\bar{\varepsilon}}{\rho c} = \frac{\alpha \bar{\sigma}_a \bar{\varepsilon}}{\rho c J}, \quad (6)$$

kde:  $\sigma_0$  ... střední hodnota  $\sigma$  na intervalu  $\langle 0, \varepsilon \rangle$ ,  $\alpha$  ... část pohlcená energie,  $J$  ... mechanický ekvivalent tepla (pro jednotky SI se  $J = 1$ ).

#### Teplo vznikající třením:

Projeví se nárůstem teploty, která je vyšší v kontaktní ploše a klesá kolmo směrem do materiálu a nástrojů. Pokud zanedbáme tento teplotní gradient, pak lze přírůstek teploty vyjádřit jako:

$$\Delta T_f = \frac{\mu p v S_k \Delta t}{\rho c V J}, (7)$$

kde:  $f$  ... součinitel tření,  $p$  ... normální tlak v kontaktní ploše,  $\Delta t$  ... uvažovaný teplotní interval,  $v$  ... relativní rychlost třecích ploch,  $V$  ... objem tělesa zvyšujícího teplotu,  $S_k$  ... velikost kontaktní plochy

Rozlišujeme dva druhy - tření aktivní, tedy žádané, a pasivní, které způsobuje opotřebení nástrojů, brzdí šíření plastické deformace a spotřebovává energii. Vlivem tření dochází ke změně napjatosti, a tím pádem k ovlivnění plastického toku. Nerovnoměrné rozložení plastického toku se pak projeví na kvalitě jako rozdílné rozložení tvrdosti v průřezu výkovku. Zvolením vhodného mazání lze snížit tření a docílit tak snížení tvářecí síly a spotřebované energie.

Velikost třecích sil je určena součinitelem tření  $f$ , který je závislý na tlaku, teplotě, rychlosti deformace a stavu povrchu nástrojů. Jeho velikost se díky nestálosti těchto vlastností mění, ve výpočtech používáme jeho střední hodnotu odvozenou experimentálně. V praxi rozlišujeme 4 základní stavy lubrikace: suché tření (ocel – ocel)  $f = 0,5$ ; mezní tření: mezi třecími plochami je jen velmi tenká vrstva maziva, která se neřídí zákony hydrauliky ( $f = 0,05 - 0,2$ ); polosuché tření: kombinace suchého a mezního tření ( $f = 0,05 - 0,5$ ); hydraulické tření (styčné plochy dokonale odděleny vrstvou kapaliny, řídí se zákony hydraulik)

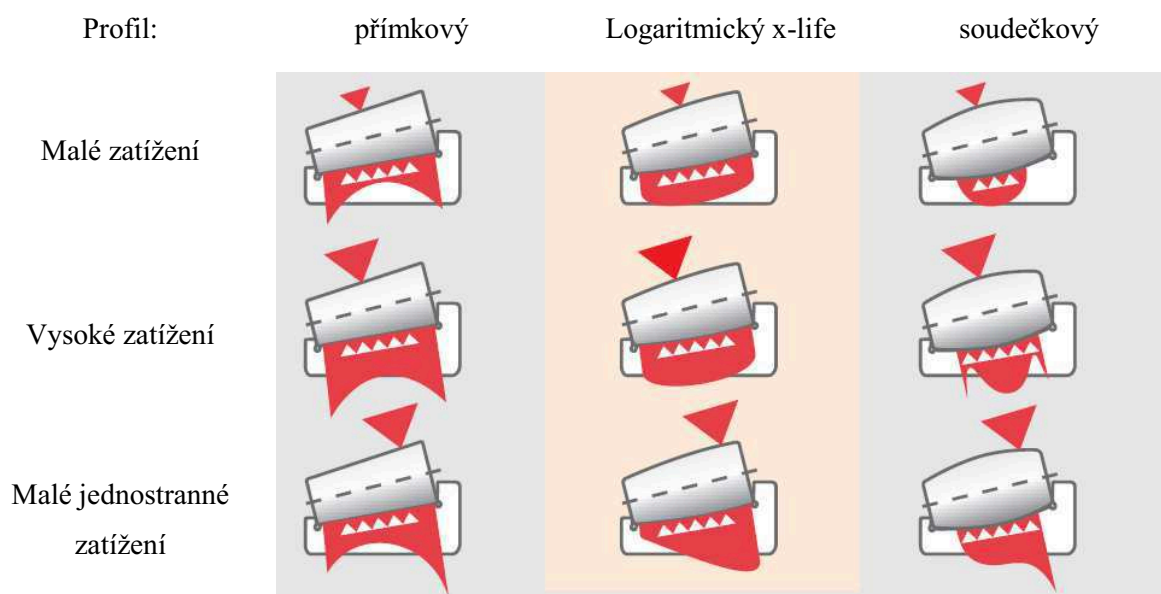
Průměrná teplota materiálu  $T_K$  v daném čase  $t$ :

Průměrná teplota materiálu je součtem okamžité střední teploty, přírůstku deformačního tepla a teploty generované třením.

$$T_K = T + \Delta T_d + \Delta T_f, (8)$$

### 3 Valivá uložení (Valivá ložiska)

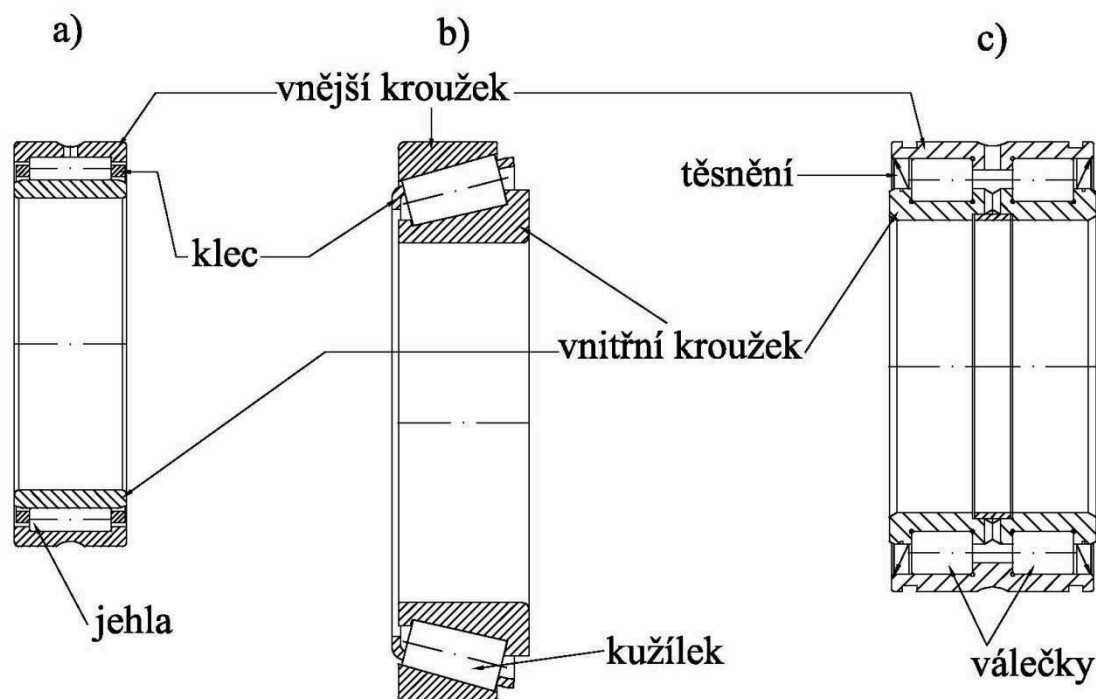
Princip valivých ložisek spočívá v otáčení čepu po valivých elementech (kuličky, válečky, kuželíky, jehly nebo soudečky). Ložiska jsou tedy sestavena zpravidla ze dvou kroužků, valivých elementů a klece. Klec pomáhá vést elementy rovnoměrně v dráze a zabraňuje vzájemnému kontaktu a tření elementů. Bývá vyrobena z měkkých materiálů s co nejnižším koef. tření nebo z plastu. Kroužky a elementy se zpravidla vyrábějí z legovaných ocelí, přesně se obrobí, poté se brousí a zakalí. Valivé elementy a oběžné dráhy na kroužcích se leští, tím se docílí mnohem menšího opotřebení a zvýší se životnost ložisek. Firma INA například nabízí pro většinu ložisek úpravu X-Life. Pod marketingovým označením se skrývá zvýšená přesnost rozměrových i geometrických tolerancí, optimalizovaný tvar trajektorií a ostatních zaoblení, jiné tepelné zpracování a zvýšená kvalita povrchu. Tyto úpravy umožňují snížené tření až o 75%, a tím pádem výrazné zvýšení životnosti. Průběh napětí vnášeného do dráhy valivých elementů v závislosti na tvaru styčných ploch je znázorněn na obrázku č. 5 z katalogu firmy INA/FAG. [4] [10]



Obr. 5 Průběh napětí vnášeného do oběžných drah kroužků – a) přímkový profil, b) logaritmický profil X-Life, c) kulatý profil (soudečky)[10]

Ložiska dělíme podle směru hlavní přenášené síly na axiální a radiální. Můžeme je také rozdělit podle tvaru valivých elementů na kuličková a válečková. Pod obecnější pojem *válečky* se řadí i ostatní valivé elementy, jako jsou kuželíky, jehly a soudečky. Ložiska

mohou být rozebíratelná nebo soudržná. Většina typů ložisek se vyrábí i v utěsněném provedení. [4]



Obr. 6 Válečková ložiska INA/FAG: a) jehlové ložisko nki65-25, b) kuželíkové ložisko 32016 - x, c) dvouradé válečkové ložisko sl045013 – pp (s rozebíratelným vnitřním kroužkem, oboustranně utěsněné). [10]

Ložiska jsou důležitou součástí velké většiny strojů. Proto jsou na ně kladeny velké nároky, zejména na jejich spolehlivost a únosnost, ale s ohledem na to že se jedná o spotřební zboží s omezenou životností, tak i na výrobní cenu.

Vývoj takto namáhané součásti samozřejmě nebyl opomenut. Nyní jsme schopni přesně předpovídat životnost ložiska v závislosti na jeho konstrukci, namáhání a otáčkách. V praxi se však často stává, že jsou ložiska přetěžována, špatně mazána, nedostatečně utěsněná, jsou moc těsně osazena (nedostatečná vůle valivých elementů), je vyosený hřídel vůči pouzdru, nebo působí přídavná síla ve směru, ke kterému ložisko není konstruováno. Každý z těchto faktorů zanechá typický otisk na drahách valivých elementů. Nejprve se na povrchu mohou objevit známky opotřebení, vtisky, rozmazané otisky elementů, koroze nebo křehké poruchy povrchu. V další fázi se objeví nebezpečné poruchy povrchu, který se začne vlivem cyklicky opakovaných povrchových napětí odlupovat a praskat. Příklad poškození ložiska vlivem nedostatečné mazání a vysokého zatížení je vyfotografována na Obr. 7.[4][9]



Obr. 7 Odlupující se povrch na drahách kroužků a kužlících[9]

Většina v současnosti používaných typů ložisek a jejich využití je zobrazeno v tabulce Souhrn výrobního programu ložisek firmy NTN-SNR a jejich hlavního využití (viz Příloha A), která shrnuje výrobní program japonské firmy NTN-SNR. [11]

## 4 Rozbor technologie výroby ložiskových kroužků

Ložiska nacházejí uplatnění téměř v každé pohyblivé mechanické konstrukci. Právě přesnost a kvalita těchto ložisek určuje a posouvá hranice přesnosti, spolehlivosti a rychlosti pohybu těchto konstrukcí, ať už jsou to ložiska kluzná, nebo valivá. Objem poptávky po ložiscích a konkurenční boj nutí výrobce hledat cesty, jak ušetřit materiál a zkrátit výrobní časy.

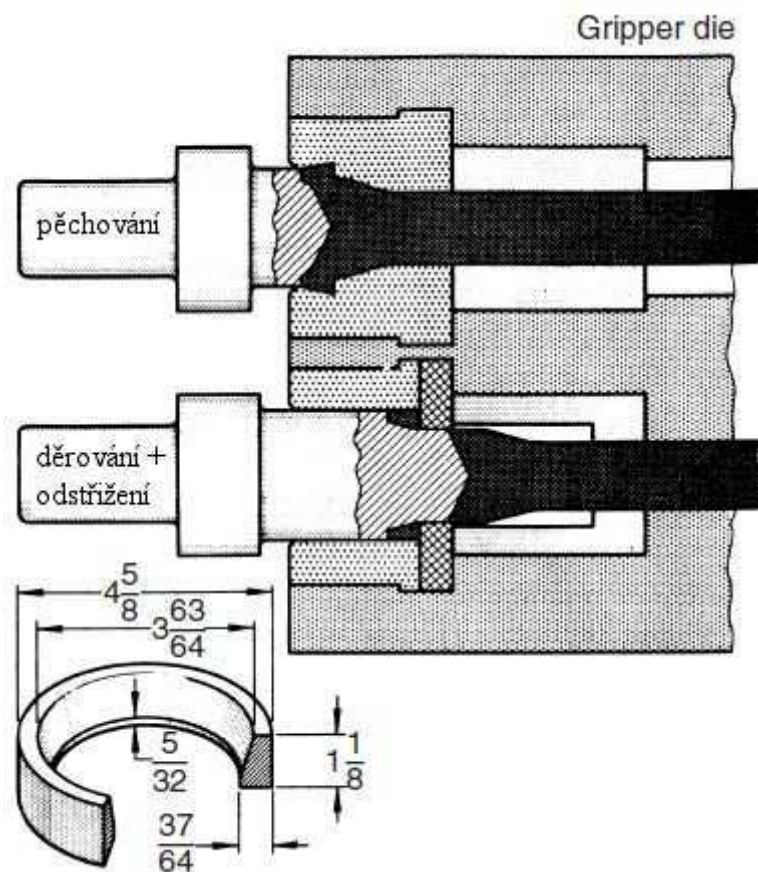
### 4.1 Výroba ložiskových kroužků klasickým třískovým obráběním

Jedná se o nejstarší metodu výroby ložiskových kroužků, která se dochovává jen ve výjimečných případech, jako je výroba ložisek netypických rozměrů a konstrukce. Jako polotovar slouží plná tyč kruhového průřezu nebo bezešvá trubka vhodných průměrů (je-li to možné). Nejdříve se za měkka polotovar hrubuje a obrábí dokončovací nožem, poté se zakalí a nakonec se brousí a leští. Dosahuje se přesností a povrchů, které umožňuje současná technologie obrábění a broušení. To lze považovat za etalon pro srovnání přesnosti s ostatními technologiemi, protože po všech objemových tvářecích operacích za tepla je nutné funkční plochy ložisek obrábět, aby bylo dosaženo tolerancí nutných pro správnou funkci a spolehlivost ložiska.

Hlavními nevýhodami této technologie jsou dlouhé výrobní časy, velký objem odpadního materiálu a drahý provoz soustružnických center a brusek. Neekonomičnost této technologie nás tedy nutí hledat tvářecí operace schopné tyto operace minimalizovat.[4][8]

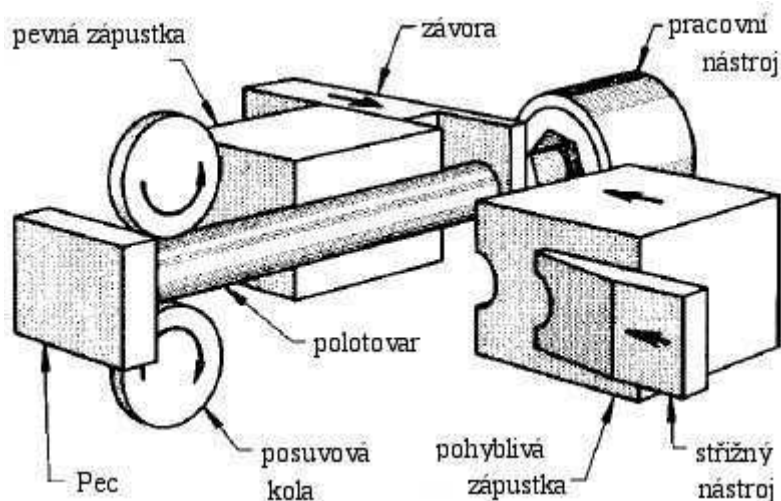
### 4.2 Tváření ložiskových kroužků na 2 operace z dlouhé tyče

Jako alternativa se nabízí dvou operační technologie přechování a stříhání za tepla. Tuto alternativu je možné využít pro širokou škálu tvarů výkovku - například designy se středovým vybráním nebo předkovaným otvorem, jako jsou třeba předkovky ozubených kol, kladek nebo kroužků různých tvarů. Musí být zaručeno vyjímání výkovku ze zápustek, proto je téměř nemožné tvářet dráhy valivých elementů na plochách rovnoběžných s osou. Často se přechování a stříhání kombinuje, aby bylo dosaženo vyplnění a napřechování zápustky, snížena spotřeba materiálu, a byla odstraněna jedna nebo více z následných obráběcích operací. Maximální hloubka, kterou jsme touto technologií schopni stříhat, je omezena pevností materiálu stříhadel. Jako polotovar se používá tyč kruhového průřezu.[12]



Obr. 8 Pěchování a stříhání na 2 operace za tepla (rozměry výkovku v palcích [in])[12]

Na Obr. 8 je náčrt příkladu kruhového výkovku ložiskového kroužku kužellového ložiska. Jako polotovar je použita tyč z ocelové slitiny AISI 4720 o  $\varnothing 65$  mm a délce 3 m. Kroužek je tvářen na vodorovném kovacím stroji délky 125 mm na 2 operace bez výronku. V první operaci dojde k napěchování na ideální předkovek, v druhé k děrování a ostřížení. Tato technologie je téměř bezztrátová, takže z každé tyče dlouhé 3 metry je vykováno 68 kroužků. Z důvodu ochlazování materiálu v kontaktech s nástroji a prostředím se předehřívá na teplotu  $1205^{\circ}\text{C}$  pouze krajní část, a to buď v plameni ohříváné komorové peci, nebo indukčně. V případě komorové pece se předehřev opakuje po každých 3 kusech. U indukčního ohřevu může být zpracována celá tyč bez přerušení. Není možné kontrolovat prostředí v peci, proto bývá instalováno zařízení omezující vznik okují a snižující jejich přenos do kovacího stroje. V takovéto peci dosáhnou dva pracovníci produkce 150 ks za hodinu. Zápustky jsou vyrobeny z nástrojové oceli řady AISI H11, ta je navíc tepelně upravena na tvrdost 37 HRC. Pokud jsou zápustky vyměněny za nové po 8000 ks, je zaručeno dodržení tolerance 0 mm až +1,6 mm. [12]



Obr. 9 Náskres soustavy nástrojů pro pēchování [12]

Na Obr. 9 je schematický příklad sestavy nástrojů pro technologii pēchování. Tyč vyjíždí po co nejkratší dráze z pece, o pohyb se starají dvě posuvová kola. Poté se zastaví o odměřovací závora a je sevřena pohyblivou zápustkou. Tvářecí nástroj je umístěn v ose výchozího polotovaru. Po ukončení tvářecích operací je kus odstřižen střížným nástrojem.[12]

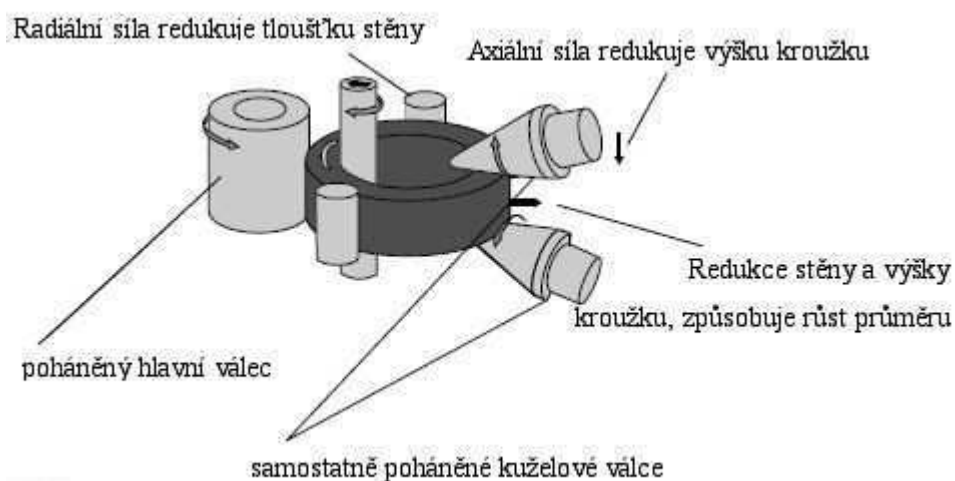
#### 4.3 Axiálně-radiální válcování kroužků za tepla

Jedná se o v současnosti zřejmě nejprogresivněji se vyvíjející a rozšiřující technologie výroby bezešvých kroužků. Jedná se o úzce specializovaný tvářecí proces prováděný na specializovaných strojích. Kroužek zpracovaný touto technologií je vyroben s menším množstvím odpadního materiálu, rychleji a přesněji. Navíc je díky příznivému toku materiálu po obvodu rozložení textury rovnoměrné, a kroužek je tak pevnější než při tváření ostatními technologiemi. Další výhodou vyplývající z podstaty této přírůstkové tvářecí technologie je zlomek potřebné síly k vytvoření součásti, než by bylo potřebné při kování v zápustkách. Současně je pak tedy možné formovat mnohem větší a složitější kroužky, objímky nebo příruby. Většina kroužků se tváří za tepla, ale stejně dobře může být tato technologie využita i pro tváření za polotepla nebo pro menší kroužky za studena, pokud je požadována větší přesnost kroužků nebo zpevnění materiálu.

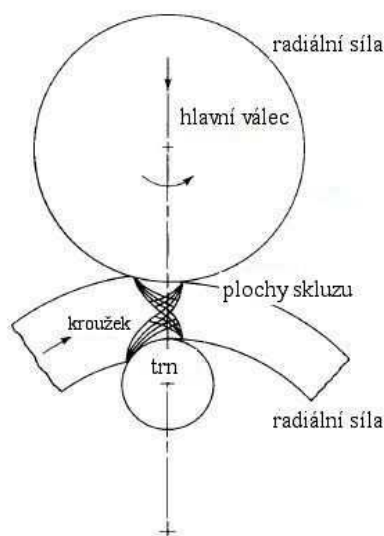
Jako polotovar se pro technologii válcování kroužků na trnu používají napēchované předkovky ve tvaru „koblihy“, kde odpadní materiál tvoří objem blány po prostřižení otvoru pro trn a objem výronku. Bylo ověřeno i použití bezešvých trubek uříznutých na délku odpovídající objemu ideálního předkovky. Schéma pracovních nástrojů je prezentováno níže (viz Obrázek č. 10). Připravený prostřižený polotovar se nasadí na trn menšího průměru, který se nachází naproti hlavnímu poháněnému válcí. Vnitřní trn se



posouvá radiálním směrem k hlavnímu válci, kolem své osy a je unášen na ložiscích. Takto začne trn přitlačovat kroužek k hlavnímu válci a ten se díky tření začne otáčet ve směru otáčení hlavního válce. Současně se začíná otáčet i vnitřní trn. Vyvinutý radiální tlak společně s rozdílem průměrů trnu a hlavního kola způsobí vznik skluzových rovin (viz Obr. 11). Protože je radiální tlak poměrně malý, iniciuje disipovaná energie vznik skluzových rovin v největší míře na vnějším a vnitřním obvodu. To znamená, že plastická deformace je nejvíce zastoupena ve směru od povrchu vnitřního a vnějšího obvodu ke středu polotovaru, kde má materiál tendenci zůstat pevný nebo plastický. Přetvoření materiálu výrazné k okrajům je zobrazeno na Obr. 12. Zvětšování průměru kroužku je způsobeno nerovnoměrnou deformací, která je na vnitřním průměru o něco větší než na vnějším a ke středu klesá (ohnisko skluzových pásem je vychýleno od středního průměru kroužku k směrem k trnu. [12]



Obr. 10 Schéma tvářecího stroje pro radiálně-axiální válcování kroužků[12]



Obr. 11 Schéma radiálního válcování kroužku – skluzová pásma [12]

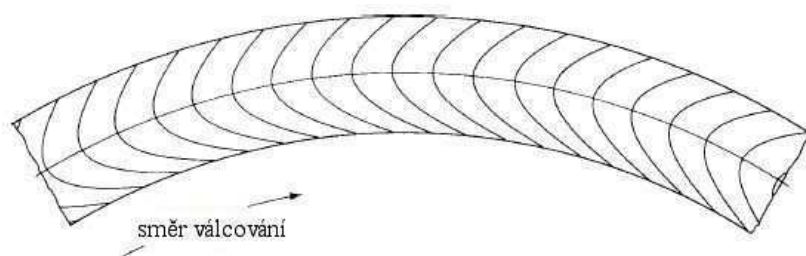
Tvářecí operace je ukončena po dosažení zadaného vnějšího průměru. Centrovací ramena, která jsou v průběhu válcování neustále řízena, udržují kroužek vycentrovaný a omezují tak vznik vad způsobených nežádoucím napětím (především se jedná o vady geometrie). Současně může být redukována i výška kroužků. K tomu složí dvě poháněná kuželová kola, postavená v opozici, vyvíjející axiální sílu. Pokud axiální kola chybí, je maximální výška kroužku omezena výškou hlavního válce. Díky rychlému vývoji numerického řízení procesu je v současnosti běžné, že se dosahuje poměru tloušťky stěny-výška kroužku 20 : 1 pro kroužky typu přírub nebo podložek. Pokud je však válcování rozděleno na více operací a pokud je připraven speciální předválcovaný kroužek, dosahuje poměr stěna-výška až 28 : 1. Pro kroužky typu objímek je běžné dosažení poměru tloušťka stěny-výška kroužku 1 : 25, ale na číslicově řízených strojích je možné dosáhnout poměru až 1 : 30. S ohledem na změnu průřezu by pak měl být poměr ztenčení stěny a výšky kroužku pečlivě regulován podle následujícího vztahu:

$$\frac{\Delta b}{\Delta h_k} = \frac{h_k}{b} \quad (9)[12]$$

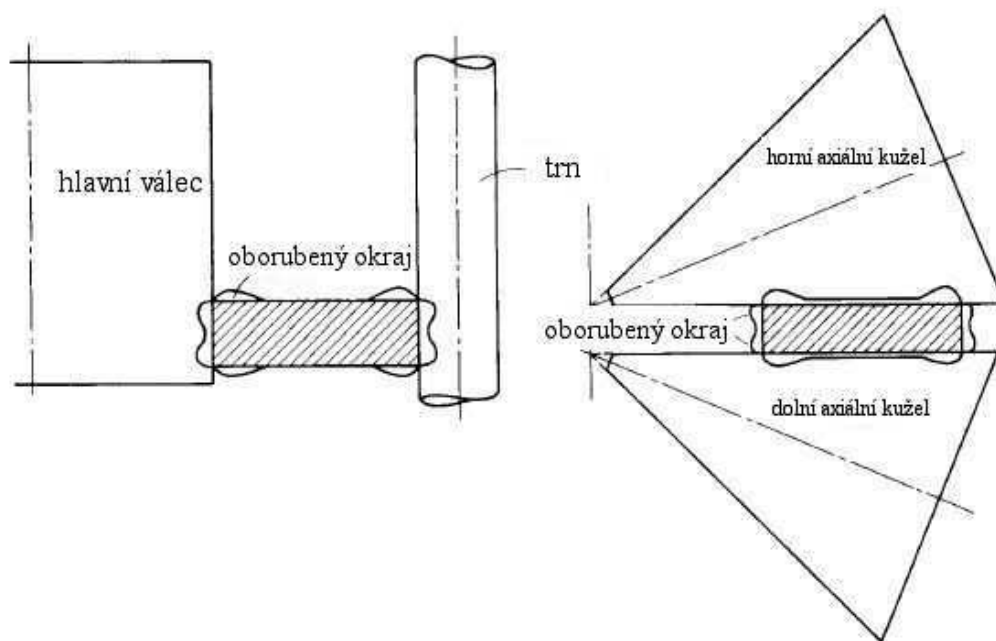
, kde  $\Delta b$  je přírůstek ztenčení stěny,  $\Delta h_k$  je přírůstek snížení výšky,  $h_k$  výška kroužku a  $b$  je tloušťka stěny. Rovnice je odvozena s ohledem na situaci, která nastane po volném průchodu válci.

$$h_k^2 - b^2 = konst. \quad (10)[12]$$

Pokud není zvolen správný poměr stěna-výška a optimální technologický postup, může vzniknout obroubený okraj, jak je vidět na obrázku č. 13. To je způsobeno nevyváženým poměrem radiálního a axiálního tlaku. Pokud proces není zastaven a radiální ztenčení stěny je výrazně větší, může vzniknout prohloubení ve střední části čelních ploch. Pokud je v nepoměru axiální snížení výšky, může nastat situace, kdy je kroužek před průchodem axiálním kuželovým kolem na okrajích výrazně vyšší, a to způsobí zkroucení kroužku v axiálním směru.



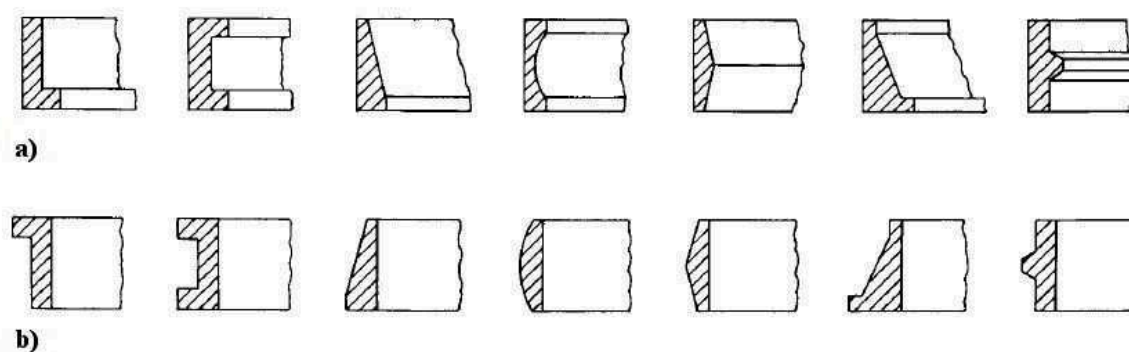
Obr. 12 Relativní dislokace materiálu - výraznější k okrajům. Zatímco uprostřed průřezu je materiál vcelku nedotčený, tak na okrajích je přetvořený[12]



Obr. 13 Vznik oborubených okrajů vlevo: axiálním směrem po ztenčování stěny radiálními nástroji, vpravo: po průchodu axiálními kužely radiální rozšíření na okrajích[12]

U moderních CNC řízených strojů je distribuce materiálu řízena dynamicky v průběhu válcování. Operátor si může zvolit, zda chce materiál distribuovat po vnitřním obvodu, vnějším obvodu nebo na čelních plochách. Rozpětí rozměrů kroužků vyráběných touto technologií je velmi rozsáhlé. Vyrábějí se kroužky od vnějšího  $\varnothing 75$  mm až po  $\varnothing 9$  m, výšky kroužků od 12 mm do 3,8 m a váhy cca od 0,3 do 90 000 kg.

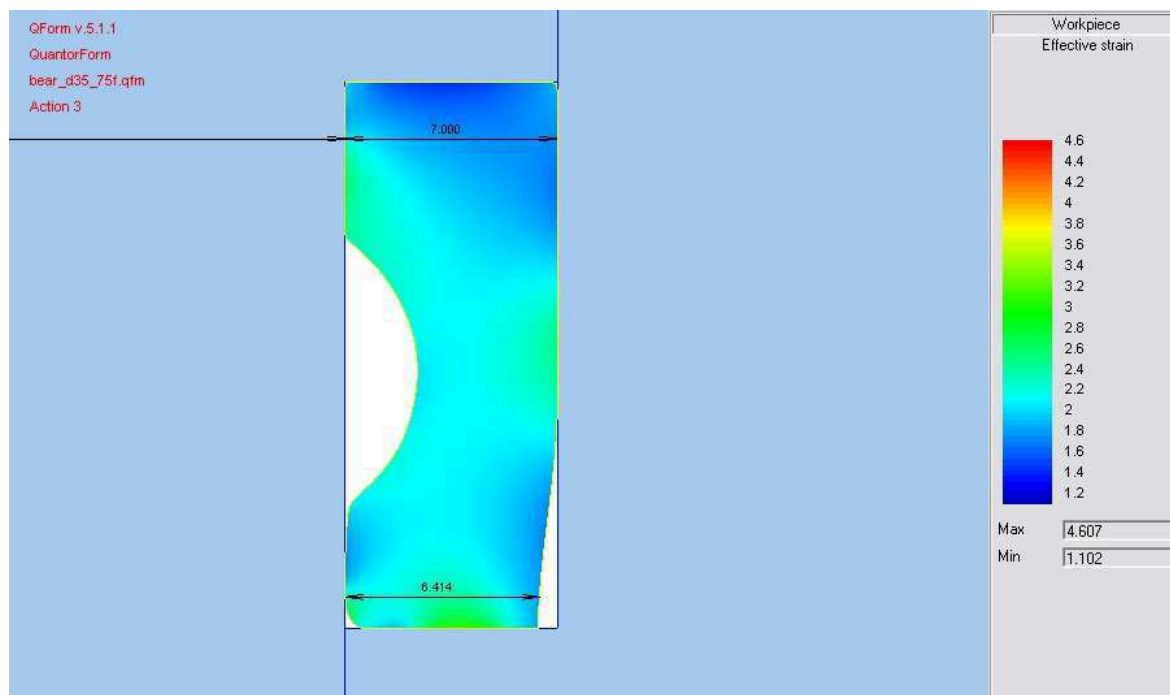
Technologie válcování díky svým nesporným výhodám nachází uplatnění u širokého spektra výkovků z různých odvětví jako je dopravní technika, letecký průmysl, energetický průmysl nebo jiná komerční průmyslová zařízení. Typické tvary řezu kroužků se rozdělují do tří základních skupin (viz obrázek č. 14). Jedná se o kroužky bez složité kontury, s vnitřní konturou, s vnější konturou a s oboustrannou konturou. Příkladem typických kroužků a tvarově podobných výrobků mohou být prstencová ozubená kola, součásti spojek, ložiska, železniční kola, příruby nádrží nebo díly podvozku těžké manipulační, stavební nebo těžební techniky, jako jsou pohonná ozubená a vodící kola. Silné uplatnění nachází také v oblastech leteckých a tryskových motorů, které se většinou válcují z tepelně odolných a těžko tvářitelných slitin, jako jsou nerezavějící oceli, a titanové a niklové super-slitiny. U těchto extrémně drahých materiálu a přísně kontrolovaných produktů je velice žádoucí přiblížit se tvářením co nejvíce ke konturám finálního výrobku. Tím se omezí komplikované obrábění, zmenší se objem odpadního materiálu a zaručí se příznivá a po obvodu stejnorodá textura.[12]



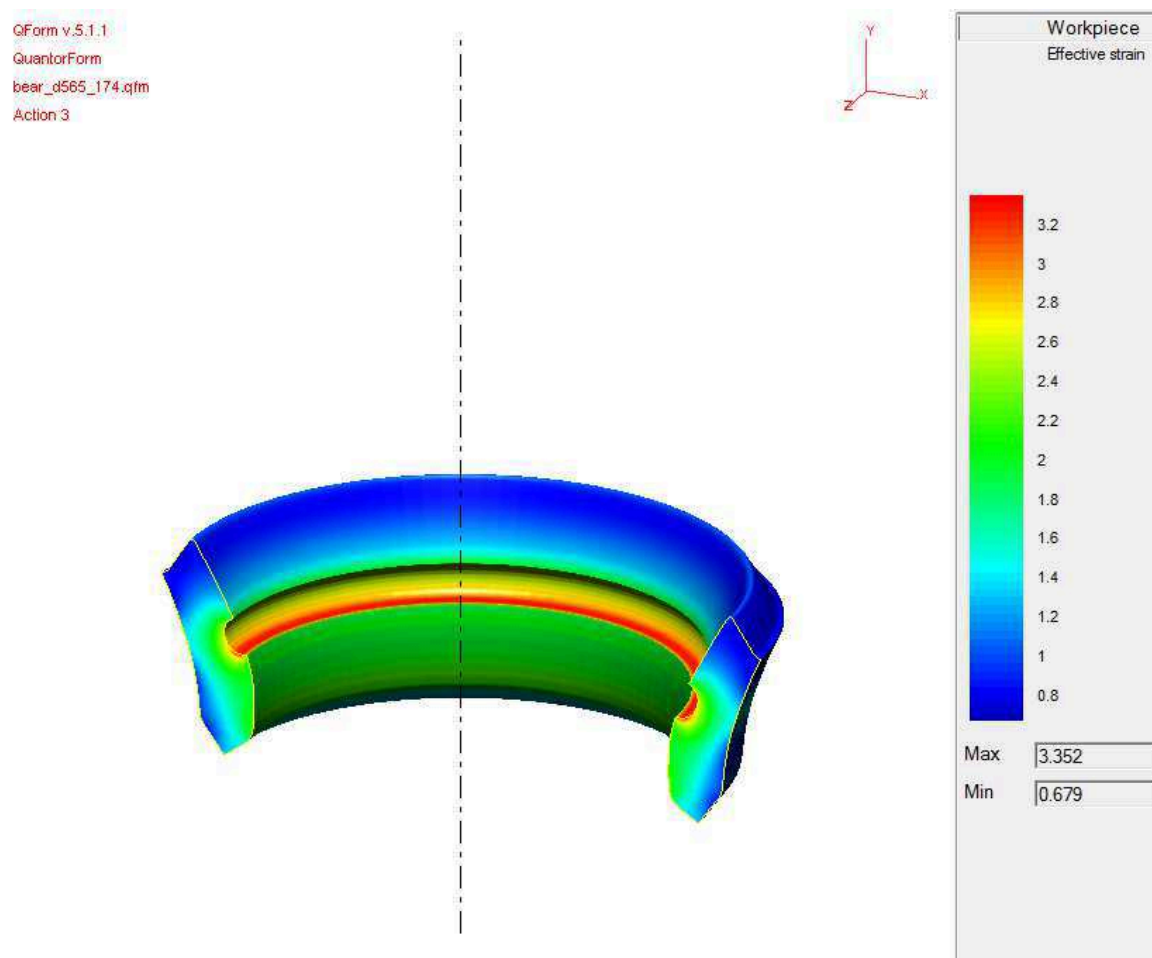
Obr. 14 Typické řezy radiálně-axiálních válcovaných kroužků s konturou a) s vnitřní, b) s vnější. [12]

#### 4.4 Tváření kroužků převrácením na trnu za tepla

V navrhované alternativní technologii uvažujeme obdobný postup přípravy polotovarů jako při válcování. Polotovar má ale odlišný tvar. V našem případě je to tvar misky, ale mohl by to být i kroužek typu příruby, do kterého je z horní strany předlisována dráha valivých elementů. V následující operaci se v misce současně prostřihne středová blána a ostříhnou výronky, tak vznikne polotovar kroužku pro převrácení na trnu. Při konstrukci polotovaru kroužku musíme zohlednit nejen aspekty tváření za tepla, ale i cestu nejmenšího odporu, místo největší koncentrace hmotnosti, střed otáčení plochy řezu a úhel prvního doteku s trnem a zápustkou. Největší koncentrace hmotnosti je v těžišti plochy řezu, ten lze snadno spočítat. Nelze však přesně určit bod otáčení kroužku, ten se pohybuje po křivce, která je ovlivněna celkovou geometrií a tuhostí polotovaru, deformacemi jeho kontury a geometrií náběhových křivek na trnu a zápustce. Ideální situace by nastala, pokud by se těžiště a střed otáčení shodovaly a zároveň se neměnil jejich poloměr od osy kroužku. Kroužek by se poté teoreticky deformoval od těžiště souměrně. Směrem k vnitřnímu průměru je deformace způsobena tahovým napětím a směrem k vnějšímu průměru působí napětí tlakové. Jinak řečeno, na vnějším okraji je vlivem zmenšování průměru přebytek materiálu a na vnitřním, kde se průměr zvětšuje, je nedostatek. Může tedy snadno dojít k situaci, kdy není spodní část zápustky vyplněna. Takto deformovaný kroužek je vidět na obrázku č. 15.[13]



Obr. 15 Zeslabení stěny kroužku ve spodní části [14]



Obr. 16 Deformace kontury obvodové dráhy v průběhu otáčení [14]

Už v průběhu otáčení je vidět, že kontura předem vytvarované dráhy se deformuje. Další deformace kontury nastane při dolisování kroužku, které je nutné k vyplnění zápustky. Deformace kontury je vidět na obrázku č. 16. Na hraně obvodové dráhy dokonce dochází ke špičkám deformace (červená oblast). Obrábění zdeformované kontury je pro řezné nástroje často náročné, neefektivní a z ekonomického hlediska nevýhodné. Tvarování drah tedy můžeme vypustit, ale navýší se tím objem materiálu nutný k obrábění, zejména u některých typů ložisek. Odpadní materiál se skládá z opalu (zhruba 5%) a odstřiženého materiálu (blána a výronek).

#### **4.5 Technické požadavky na tvářené kroužky**

Na ložiska jsou vyvíjeny velké nároky, zejména ve směru jejich spolehlivosti a únosnosti. Stejnorodá struktura bez zhrubnutí zrn a optimalizovaným tokem materiálu je prvním předpokladem splnění vysokých nároků. Faktorem ovlivňujícím životnost ložiska je také tolerance souososti a celkového házení kroužku. Ty jsou ale spíše výsledkem následného obrábění. Finální kroužek, u kterého je na povrchu materiál výrazně přetvořený a uprostřed relativně nedotčený, bude na povrchu zpevněný a tvrdší ale uprostřed stále pružný a tvárný.

Naopak různorodost rozměrů a tvarů ložiskových kroužků klade nároky na schopnost technologie, flexibilně obsáhnout výrobu ložisek všech typů a rozměrů. Přehled ložisek a jejich využití je uveden v Příloze A.

## 5 Návrh technologie přesného tváření polotovaru ložiskových kroužku

### 5.1 Výběr a sled potřebných operací

V mém případě otáčíme vnější kroužek  $\varnothing D = 125 \text{ mm}$  kuželíkového ložiska z katalogu firmy **INA/FAG 32016–x**. Jeho charakteristický tvar kuželových ploch, na kterých se nachází valivé dráhy, soustřeďuje větší část hmotnosti objemu na jednu polovinu od střední výšky kroužku. Tento fakt musíme zohlednit při konstrukci polotovaru. Tvar misky s vystřiženým dnem se zdá být optimálnější, protože takto zhotovený polotovar kroužku se při prvním kontaktu s nástroji dotkne pod ostrými úhly. To znamená, že poté se otáčí po kratší dráze a současně těžiště řezu se nachází v blízkosti bodu otáčení. Je však nutné přechovat složitější tvar a přechování přesné obvodové dráhy nepřichází v úvahu.

#### 5.1.1 Přechování za tepla

Tvar našich zápustek je složitější než při přechování mezi tuhými deskami. V první fázi kování, kde jsou zápustky rovné, ji však lze tak uvažovat. V další fázi se začne vyplňovat kontura budoucího kroužku. Zápustky jsou opatřeny výronkovým můstkem, aby bylo dosaženo dokonalého vyplnění a přebytečný materiál mohl odtéci. Budeme se tedy řídit principy zápustkového kování. [3]

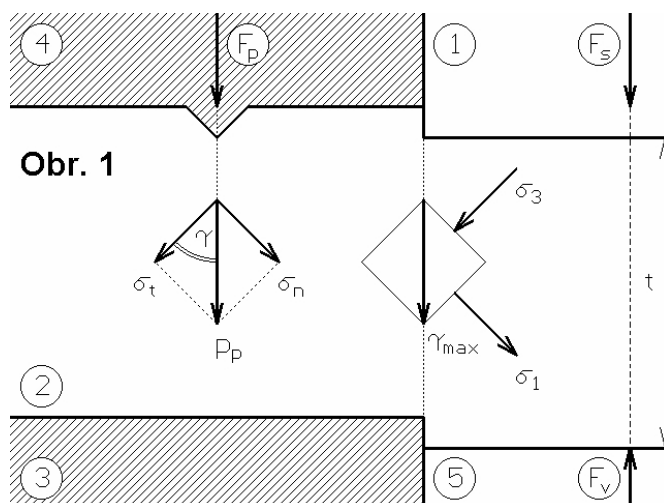
Norma **ČSN 22 8306** uvádí pro výpočet kovací síly zjednodušenou metodu charakteristik podle Tomlenova. Norma nabízí také zkrácenou formu výpočtu vhodnou především pro tvarově jednodušší výkovky. Jedná se o empirický vztah vyvinutý ve Šmeralových závodech v Brně. Tento výpočet je pouze orientační.[8]

$$F_k = (1 - 0,001D_V) \cdot \left(2 + 0,1 \frac{D_V}{H_S}\right) S_V \sigma_P \quad (11)[3]$$

#### 5.1.2 Prostřihování

Pro prostřihování otvorů se jeví jako nejvýhodnější technologie přesného stříhání. Výhodná je zejména díky dobré kvalitě vzniklých střížných ploch. Na rozdíl od volného stříhání, kde je rozvoj plastické deformace nerovnoměrný, u přesného stříhání se šíří plastická deformace téměř po přímce. To je dosaženo použitím přidržovače na volných plochách polotovaru. Při stříhu pak v polotovaru vznikne složité tlakové pole, které omezí šíření deformace pouze na úzký pás. Silové schéma technologie s použitím přidržovače s nátlakovou hranou je na obrázku č. 17. Střížník (1) působí na polotovar (2), ten je

současně přitlačován přidržovačem (4) proti střižnici (3). Přidržovač obsahuje nátláčnou hranu, díky které v oblasti stříhu působí převážně tlakové pole napjatosti. Šíření tohoto tlaku v radiálním směru  $\sigma_1$ , způsobuje vodorovná složka  $\sigma_n$  přitlačné síly  $F_p$ . Pokud je dosaženo rovnosti  $|\sigma_3| = |\sigma_1|$ , pak výslednice těchto sil se jistě nachází v rovině smyku  $\tau_{kr}$ . Díky převažující tlakové složce se vznikající trhliny uzavírají a nedochází ke křehkému lomu.



Obr. 1

Obr. 17 Stav napjatosti materiálu při přesném stříhání [15]

Po dosazení  $\sigma_1 = -\sigma_3$  do podmínky plasticity:  $\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{2}{\sqrt{3}}R_e$ , vyplývá vztah pro pevnost ve stříhu  $R_{ms}$ :

$$R_{ms} = \tau_{kr} = \sigma_1 = \frac{1}{\sqrt{3}}R_e \approx 0.58 R_e \quad (12) [15]$$

Výsledná střížná síla  $F_s$ :

$$F_s = l_s(t - h_p)R_{ms} + F_V + F_f \quad (13) [15]$$

Kde:  $F_V$  ... síla nutná k překonání odporu vyhazovače,  $F_f$  ... výsledný vektor třecích sil,  $t$  ... tloušťka blány

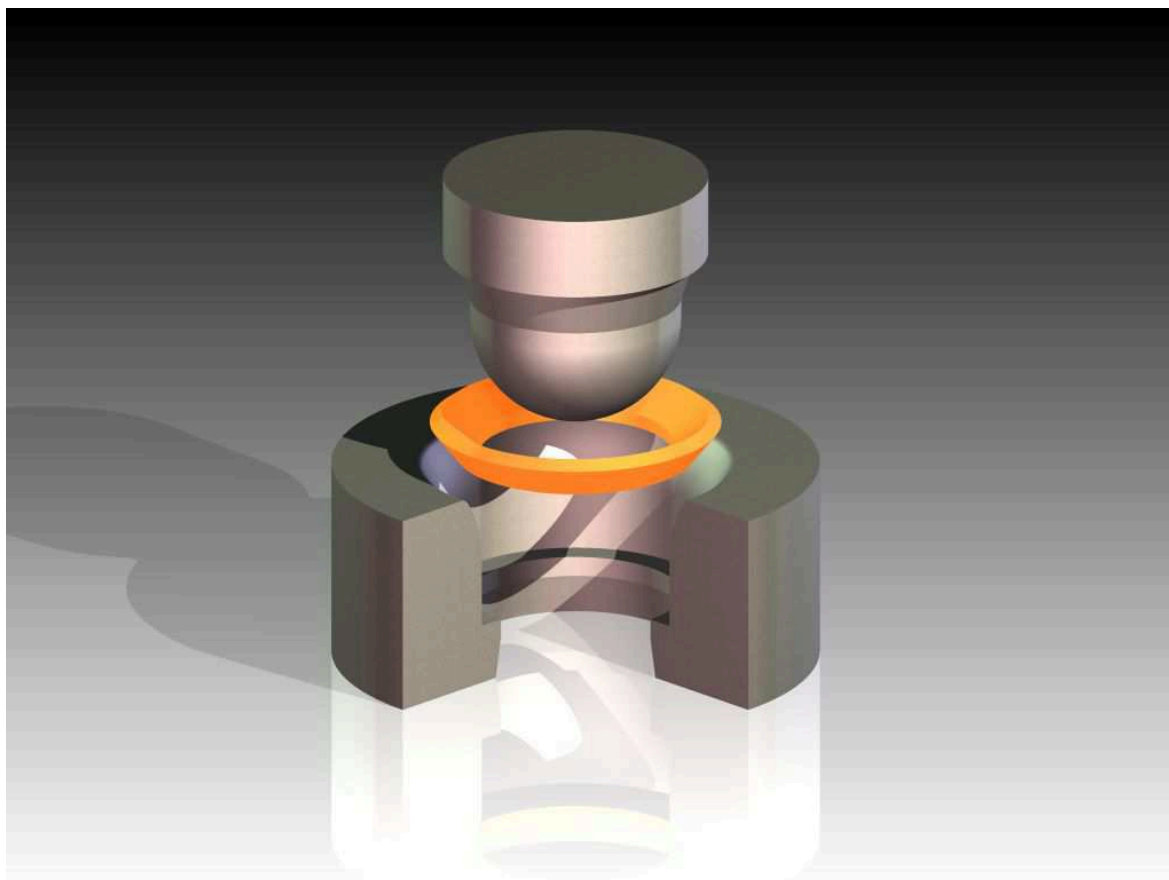
Technologie prostřihování by se dala kombinovat s pēchováním. Návrh designu zápustek kombinovaných nástrojů je v příloze na Výkrese č. 6. Významně by se tím ušetřily náklady za výrobu stříhacích nástrojů a přidržovače. Současná verze Qform bohužel nedokáže rozdělit polotovary na 2 kusy. Z tohoto důvodu jsme simulovali pēchování, ale technologii stříhání musíme nahradit analytickým výpočtem tvářecích parametrů. Objem polotovaru jsme pro následnou operaci určili geometrickým omezením v místě teoretické linie stříhu. [15]



### 5.1.3 Tvarování obvodové dráhy

Během návrhu technologie jsme experimentovali s možností tvarování obvodových drah. Setkali jsme se však spíše s komplikacemi. Zaprvé není možné klasickým lisem vytvarovat obvodové dráhy na šikmé plochy ve směru rázu, zadruhé jsou při otáčení kroužku patrné výrazné deformace kontury a za třetí není možné napěchování kroužku do zápustky. Alternativní možností by bylo tvarovat dráhy valivých elementů, technologii válcování kroužku do uzavřené zápustky, na již otočený kroužek.

### 5.1.4 Otáčení pomocí trnu



Obr. 18 Schéma trnu, zápustky (3/4 řez) a kroužku (prostrážená miska)

Navrženou samostatnou operaci otáčení (viz obrázek č. 18) lze rozdělit na 3 základní fáze: otáčení, stagnace, přechování. Nástroje a polotovar se přiblíží na dotek. V průběhu pracovního zdvihu se kroužek nejprve otočí o první úsek, poté nastane fáze stagnace, kdy je kroužek pouze vtahován do zápustky. Před závěrečným přechováním se kroužek dotočí o zbývající úhel. Zápustka je uzavřeného typu, není tedy možné docílit dokonalého zaplnění. Materiál nedokáže vyplnit ostré rohy, proto nedojde k úplnému vyplnění hran zápustky. Pokud tuto skutečnost zohledníme při projektování zápustek a

výpočtu objemu polotovaru, není to na závadu. Sestava nástrojů je zobrazena na příloze Výkres 7 - Sestava nástrojů pro otáčení kroužků.

### 5.3 Výpočet objemu výkovku a rozměry polotovarů

Kruhová tyč válcovaná za studena - KR Ø80x27,931 h11 ČSN 42 6510 – 14 109.1

$$V_{polotovar} = \pi r^2 L = 140\,396,52 \text{ mm}^3$$

$$V_{miska} = 139\,756,38 \text{ mm}^3$$

$$V_{m.prostřižená} = 93\,328,29 \text{ mm}^3$$

$$V_{odpad} = 46\,415,73 \text{ mm}^3$$

$$V_{kroužek} = 93\,327,98 \text{ mm}^3$$

Design polotovarů včetně technologických přídavek lze nalézt v příloze Výkres 4 – Polotovary pro jednotlivé technologie. Při návrhu polotovaru kroužku, lze objem regulovat několika způsoby. Nejjednodušší je měnit poloměr vystřižené díry. Pokud se však výrazně odchýlí těžiště plochy řezu od osy otáčení, může dojít k tomu, že za a) trn vtáhne kroužek do zápustky neotočený, nebo za b) že je neotočený kroužek natažen na hranu kontury zápustkové dutiny trnu. Další možností je pozměnit konturu polotovaru kroužku. Můžeme změnit úhel sklopení budoucí stěny, a tak zároveň účinně regulovat úhel prvního dotyku, nebo můžeme měnit úhly povrchových přímk radiálních stěn, a zároveň tak korigovat nedostatek materiálu na vnitřním a přebytek materiálu na vnějším poloměru při otáčení.

### 5.4 Výkres výkovku

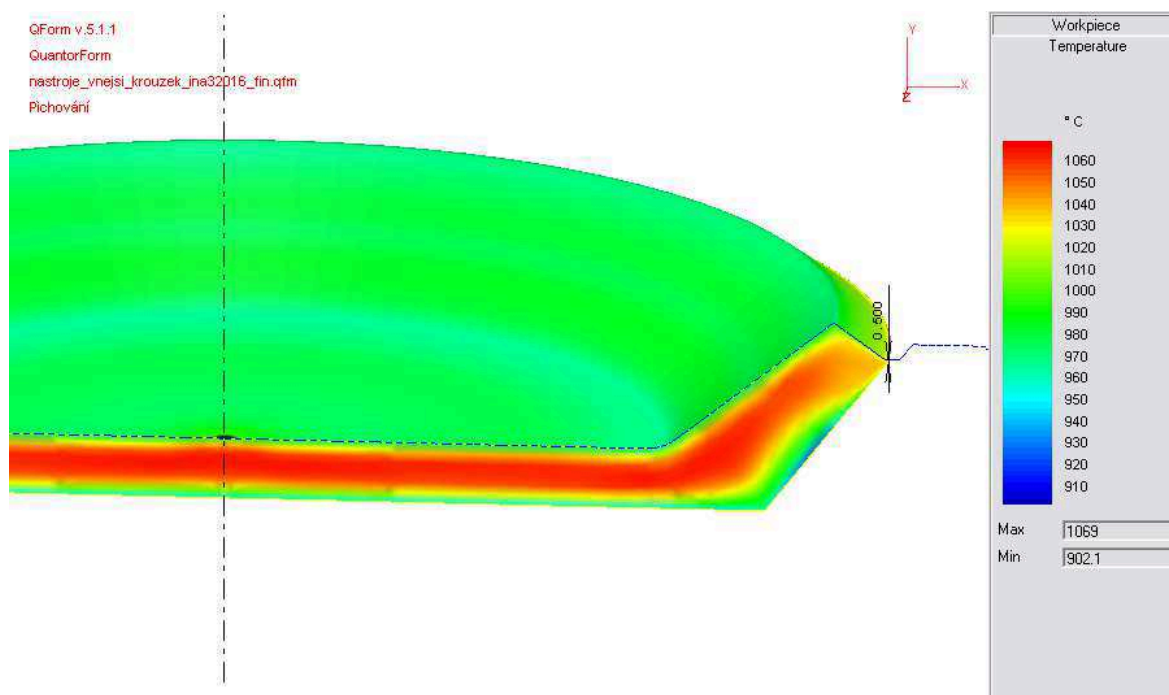
Přesnost výkovků stupně 3: Mezní úchytky finálního výkovku po převrácení by neměly přesáhnout  $+0,45$  až  $-0,20 \text{ mm}$  od nominálního rozměru. Mezní odchylky tolerance souososti by neměly překročit rozmezí  $0,65 \text{ mm}$  od skutečné osy.

Norma ČSN 42 9030 stanovuje přídávky na obrábění pro velmi přesné kování: plochy  $+1,6 \text{ mm}$ , zaoblení hran  $r = 2 \text{ mm}$ , nejmenší tloušťka blány  $h = 6 \text{ mm}$ , hodnoty úkosů pro lisy s vyhazovačem: vnitřní plochy  $2^\circ$  až  $5^\circ$ .

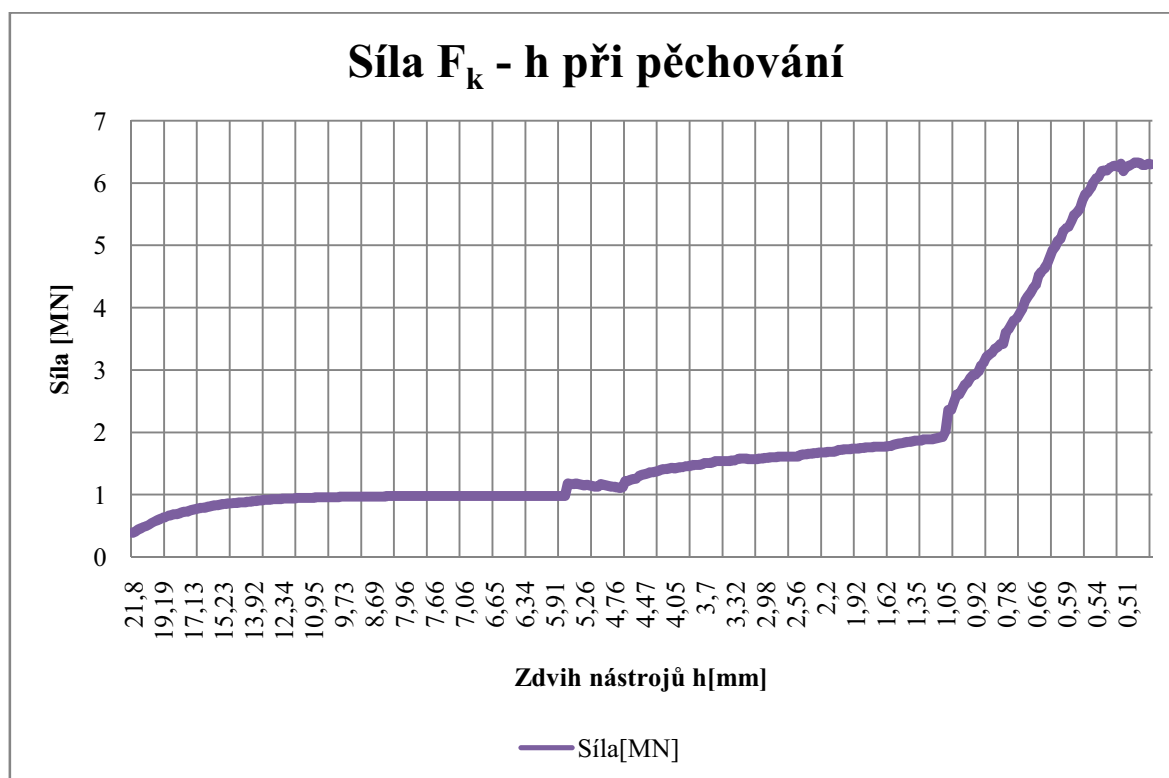
Výkres hotového výkovku před obráběním je zařazen v přílohách jako Výkres 3 – Výkovek kroužku po otočení.

## 5.5 Výpočet tvářecích parametrů

Pro pēchování:



Obr. 19 Polotovár misky po pēchování, škála teplot v průřezu, finální výška 0,5 m



Graf 1 - Kovací síla v závislosti na zdvihu

$$F_{kMAX} = 6,31 \text{ MN}$$

**Pro prostřihování:**

Jedná se o přesné stříhání kombinované s pěchováním. Tváření probíhá za tepla, bereme tedy v úvahu mez kluzu za teploty po pěchování. Použil jsem hodnotu  $R_e(1000^\circ\text{C})$  z materiálového listu programu Qform viz Obr. 21.

Vstupní parametry:  $R_e(1000^\circ\text{C}) = 141,8 \text{ MPa}$

Tloušťka blány:  $t_b = 6,63 \text{ mm}$

Poloměr prostřihovaného otvoru:  $r_b = 41,70 \text{ mm}$

Tloušťka výronku:  $t_v = 0,87 \text{ mm}$

Poloměr ostřihovaného výronku:  $r_v = 70,90 \text{ mm}$

Součinitel tření mazivo gw st h02:  $f = 0,02$

Síla vyhazovače (z Tab. 3):  $F_V = 200 \text{ kN}$

$$R_{eT} = R_e(1000^\circ\text{C}) = 141,80 \text{ MPa}$$

$$R_{ms} = \tau_s = \sigma_1 = \frac{1}{\sqrt{3}} R_{eT} \approx 0,58 R_{eT} = 81,87 \text{ MPa}$$

$$l_{sb} = 2\pi r_b = 262,01 \text{ mm}$$

$$l_{sv} = 2\pi r_v = 445,48 \text{ mm}$$

$$\sigma_n = \sigma_1 = 81,87 \text{ MPa}$$

$$\tau_f = \sigma_n \cdot f = 1,64 \text{ [MPa]}$$

$$S = l_s \cdot t$$

$$F_f = \tau_f \cdot S$$

Síla při stříhu dnaisky:

$$h_{bmin} = t_b \frac{R_{eT}}{E} = 0,014 \text{ mm}$$

$$S_b = l_{sb} \cdot t_b = 1\,737,13 \text{ mm}^2$$

$$F_{fb} = \tau_f \cdot S_b = 2\,844,32 \text{ N}$$

$$F_{sb} = l_{sb}(t_b - h_{bmin})R_{ms} + F_V + F_{fb} = 356\,145,28 \text{ N}$$

síla při ostřihování výronku:

$$h_{vmin} = t_v \frac{R_{eT}}{E} = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

$$S_v = l_{sv} \cdot t_v = 387,57 \text{ mm}^2$$

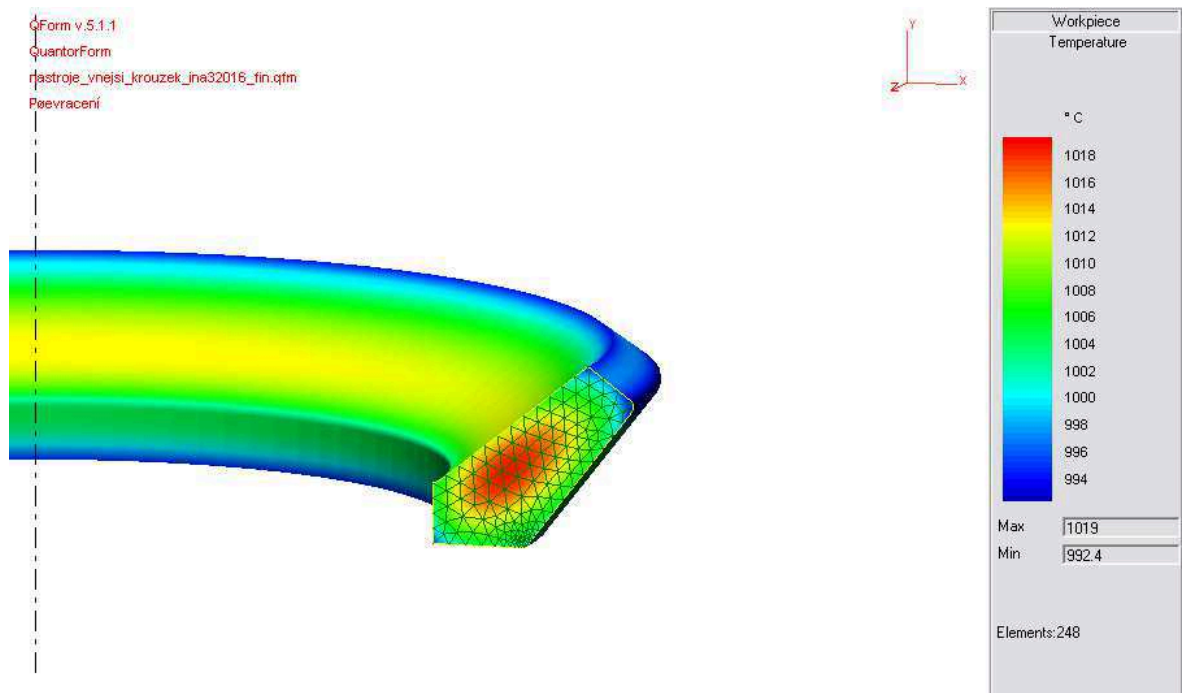
$$F_{fv} = \tau_f \cdot S_v = 635,62 \text{ N}$$

$$F_{sv} = l_{sv}(t_v - h_{vmin})R_{ms} = 31\,664,51 \text{ N}$$

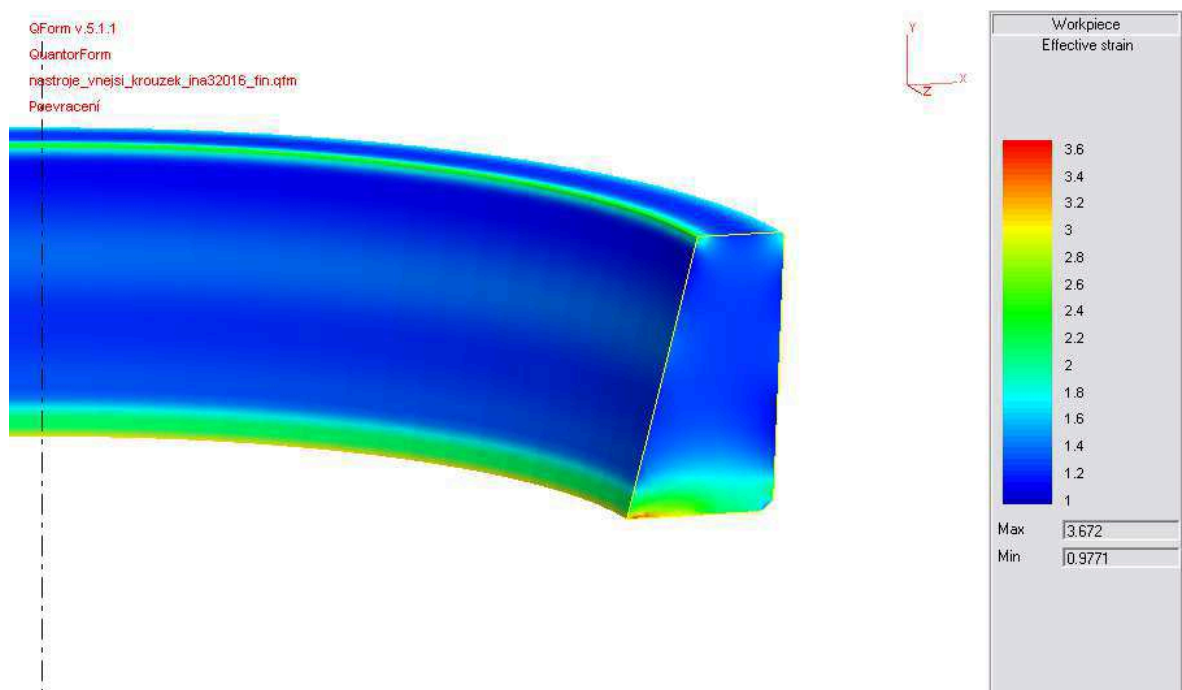
Celková síla při stříhu:

$$F_s = F_{sb} + F_{sv} = 387\,809,79 \text{ N}$$

**Pro otáčení:**



Obr. 20 Polotovár kroužku připravený pro otáčení. Teplotní škála a síť rozložení elementů uvnitř materiálu



Obr. 21 Kroužek po otočení - efektivní deformace



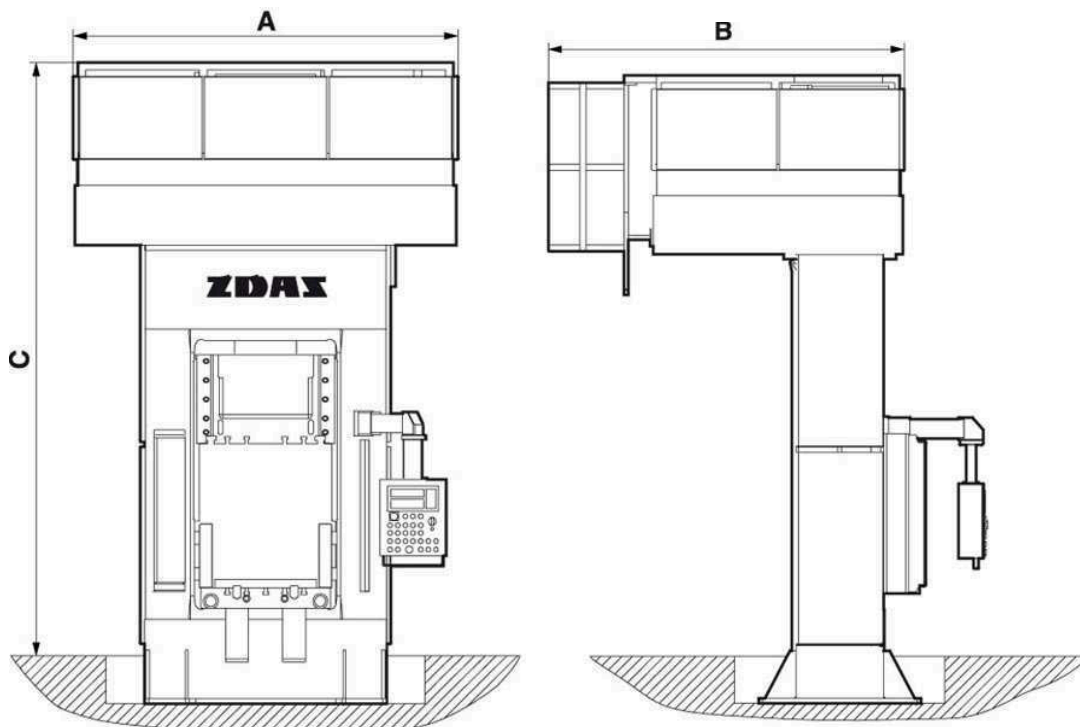
Graf 2 - Kovací síla v závislosti na zdvihu

Tabulka 1 - Srovnání vypočtených tvářecích parametrů

Srovnání parametrů tváření pro jednotlivé operace				
	Jednotky:	Pěchování:	Prostřihování:	Otáčení:
$F_{kmax}$	[MN]	6,31	0,39	3,86
$T_{min}-T_{max}$	[°C]	902,1 - 1069	1050	845,9 - 1019
$\nu$	[ms <sup>-1</sup> ]	0,20 – 0,17	-	0,2
$\sigma$	[MPa]	245,6	-	377,6
$\epsilon$	[-]	0,8 – 1,6	-	1 – 2,63
$\dot{\epsilon}$	[s <sup>-1</sup> ]	0 - 15	-	0 - 135

## 6 Konstrukční a technologický rozbor navržené technologie tváření

### 6.1 Volba tvářecího stroje



Obr. 22 Schéma velikosti hydraulických lisů řady CTH

**ŽDAS CTH 630** – svislý hydraulický lis s vlastním čerpadlem, svařovaným rámem, uzavřené skříňové konstrukce.

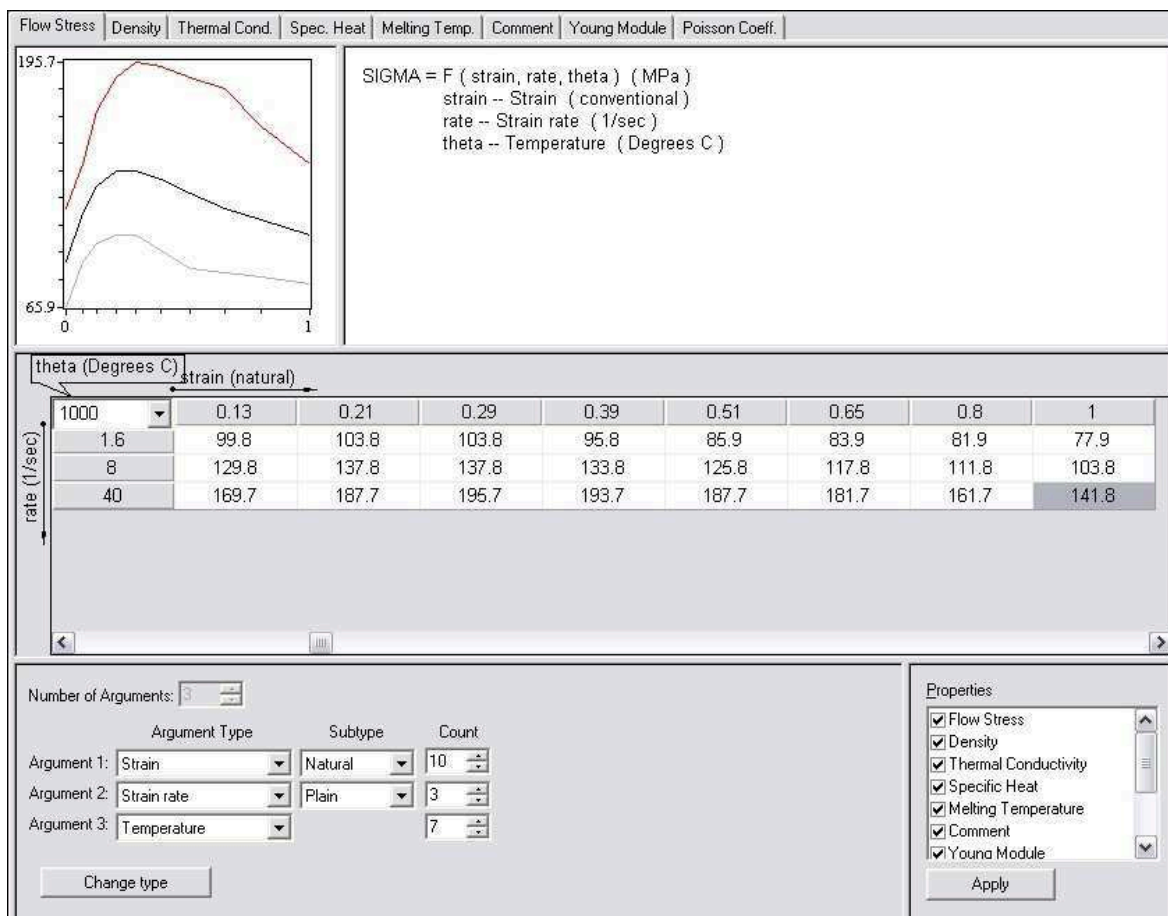
Lisy této řady jsou, díky vysoké tuhosti rámu, určeny pro objemové i plošné tváření. Výhodou hydraulického lisu stále zůstává, že v průběhu pracovního zdvihu lze měnit tvářecí rychlost v závislosti na dráze. To umožňuje přesně regulovat finální sílu. Doladěním této síly dosáhneme požadovaného tlaku bez zbytečného přetěžování nástrojů a nadměrného opotřebení. Pracovní válec je dvojčinný s plnicím ventilem a je uložen v horním příčníku. Beran je uložen v kluzném vedení s aretací v horní poloze. Vedení lze seřizovat. Lis může být doplněn horním a dolním vyhazovačem, mechanizačními a automatizačními prvky zvyšujícími produktivitu práce lisu.[16]

Tabulka 2 - Technické parametry zvoleného lisu CTH 630

Základní technické parametry		CTH 630
Jmenovitá síla	kN	6300
Zpětná síla	kN	960
Sevřená výška	mm	1250
Zdvih	mm	1250
Přibližovací rychlost	$\text{mm.s}^{-1}$	400
Pracovní rychlost – max.	$\text{mm.s}^{-1}$	63
Pracovní rychlost – min.	$\text{mm.s}^{-1}$	11
Zpětná rychlost	$\text{mm.s}^{-1}$	410
Upínací plocha stolu	$\text{mm}^2$	1600x2000
Síla přidržovače	kN	1600
Zdvih přidržovače	mm	500
Síla horního vyhazovače	kN	200
Zdvih horního vyhazovače	mm	450
Výkon hlavního motoru	kW	75
Půdorys lisu A·B	mm	4400x3600
Výška lisu	mm	7850



## 6.2 Použité materiály, jejich chemické a mechanické vlastnosti



Obr. 23 Definice materiálu v programu Qform 14 109 -  $R_e(\sigma, \varepsilon, \dot{\varepsilon})$ [14][17]

Polotovár: 14 109: Materiál je v programu Qform uživatelem definován pomocí argumentů vycházejících z tlakových zkoušek tvárnosti materiálu nebo z procesních map. Větší počet argumentů zpřesňuje výpočet predikce toku materiálu. Na Obr. 22 je definice  $R_e$  (flow stress) definována pomocí závislosti 3 argumentů ( $\sigma, \varepsilon, \dot{\varepsilon}$ ) pro 7 hodnot teploty v rozmezí od 20-1200°C. Obdobně jsou k materiálu přiřazeny další závislosti a konstanty ovlivňující tvárnost. Deformovaný materiál je v experimentu definován v závislosti hustoty na teplotě, tepelné vodivosti na T, měrného tepla na T, teploty tavení, Youngova modulu pružnosti a Poissonovy konstanty.[17]

Tabulka 3 - Materiály použité na polotovary a na nástroje

Chemické složení:			
Konstrukční chromová ocel ČSN EN 14 109.1 – 100Cr6.1		Nástrojová ocel ČSN EN 19 733 – 60WCrV7	
Chemické prvky:	Obsah prvku v objemu [%]	Chemické prvky:	Obsah prvku v objemu [%]
C	0,9 – 1,1	C	0,52 – 0,62
Cr	0,3 – 1,65	Cr	0,9 – 1,2
Cu	≤ 0,25	-	-
Mn	0,3 – 0,5	Mn	0,15 – 0,4
Ni	≤ 0,3	Ni	≤ 0,35
Ni + Cu	≤ 0,5	W	0,35 – 0,6
P	≤ 0,027	P	≤ 0,03
S	≤ 0,03	S	≤ 0,035
Si	0,15 – 0,35	Si	0,8 – 1,2

Tabulka 4 - Mechanické a fyzikální vlastnosti, kterými je definován materiál v Qform.

Mechanické a fyzikální vlastnosti:			
	Jednotky:	14 109	19 733
$R_e$	[MPa] (20°C)	≤ 1150	1800
E	[MPa] (20°C)	212000	217000
$\kappa$	[-]	0,3	0,3
Zpevnění	[-]	-	0,028
$\rho$	[kg · m <sup>-3</sup> ] (20°C)	7850	-
$T_{Tav.}$	[°C]	1529	-
$\lambda$	[W/m · K] (20°C)	39,6	-
C	[J/kg · K] (20°C)	461	-

### 6.3 Metody predikce tvářecích parametrů v programu Qform 2D/3D

#### Počáteční nastavení simulace v Qform:

Rychlost pracovního zdvihu:	.....	0,2 m/s
Maximální síla lisu:	.....	6,3MN
Doba ochlazování na vzduchu a v zápustce:	před přechováním	.....5 + 3 s
	před otáčením	.....2 + 2 s
Počáteční teplota nástrojů:	.....	100 °C
Počáteční teplota obrobku:	.....	1050 °C
Frikční podmínky f:	grafit	.....0,02

#### Qform 2D/3D

Simulace operací přechování a tváření byla provedena v programu Qform 5.1.1. Ten pracuje na principu metody konečných prvků (MKP nebo z angl. FEM). Ideou je rozdělit objem tvářeného tělesa na elementy (boxy), které mají jednoduchý a matematicky snáze formulovatelný tvar. Podle zvolené úlohy (2D/3D) se rozdělují na plošné a prostorové. Okrajovým bodům těchto elementů jsou pak přiřazeny vlastní fyzikální závislosti materiálu. Tyto vztahy je však nutné pro řešení numerickými metodami aproximovat, protože jejich exaktní výpočet je matematicky velice složitý a komplexní. Na okrajové podmínky jsou tedy aplikovány soustavy aproximovaných lineárních rovnic popisujících složité funkce ve zjednodušené formě, avšak ve výsledném měřítku s dostačující přesností. K zadávání těchto funkcí odvozených z procesních map a zkoušek tvářitelnosti materiálu slouží Database editor, kde jsou materiály (deformované, nástrojové, maziva) definovány uživatelem pomocí vybraných argumentů. Uživatel si také sám definuje strojní vybavení. Qform navíc obsahuje vlastní editor pro úpravu kontur nástrojů a polotovarů rozdělený na 2D (QDraft) a 3D (QShape).

## 7 Technicko-ekonomické posouzení navržené výrobní technologie

K technicko-ekonomickému posouzení navržené technologie nám pomohou ostatní technologie výroby ložiskových kroužků.

Nejlepších rozměrových a geometrických tolerancí dosahuje třískové obrábění. Současně je ale také technologií nejméně hospodárnou. Ve srovnání s naší technologií je už při nákupu materiálu víc jak 50% objemu odpad. Zejména u drahých a těžko obrobitelných materiálů je to neakceptovatelné. Další nevýhodou může být absence přetvoření materiálu za účelem vylepšení mechanických vlastností. Nicméně žádná z tvářecích technologií nedosahuje takové přesnosti, aby mohlo být obrábění úplně vyřazeno. Na protipólu stojí technologie přechování na horizontálních lisech z celé tyče. Tato technologie produkuje minimální množství odpadu, a to jen v podobě opalu. Také dosahuje nejvyšší produkce. Z technologického hlediska má však velmi omezené tvarové možnosti. Nelze tvarovat kontury ve směru rázu, struktura a tok materiálu není stejně příznivý jako u válcování kroužků. Další omezení plyne z maximální hloubky, kterou jsme schopni prostříhovat. Tuto hloubku definuje pevnost materiálu nástrojů.

Další srovnávanou technologií je progresivně se vyvíjející válcování kroužků, které je ze své podstaty pro tvarování kroužků nejvhodnější. Dosahuje minima odpadu (polotovary se prostříhne na průměr trnu) a současně nejlepší kvality struktury (tok materiálu po obvodu). Další výhodou je velké rozmezí průměrů, výšek a hmotností kroužků. Díky technologii válcování do zápustky a válcům s předdefinovanou konturou je nespornou výhodou i tvarová různorodost vyráběných kroužků. Nevýhody jsou nasnadě. Proces je složitý na řízení (CNC vs. manuální regulace) a drahé strojní vybavení.

Ve srovnání s těmito technologiemi se vyrovná převrácení na trnu každé alespoň v několika aspektech. Z hlediska odpadu se téměř vyrovná válcování kroužků. Pouze objem prostříhovaného otvoru a výronku je obecně větší. Velkou výhodou je provoz na běžném strojním vybavení podniku, nižší silové namáhání při procesu (nižší opotřebení nástrojů), rovnoměrná struktura díky obvodovému toku materiálu a hlavně vyšší produktivita. Lisy lze dovybavit různými automatizačními a mechanizačními prvky, jako jsou zařízení pro automatizovanou výměnu nástrojů a zařízení na výměnu a upnutí obrobku. Automatická výměna nástrojů a obrobků zkracuje ztrátový čas stroje a snižuje počet obslužného personálu. Provést exaktní ekonomické zhodnocení není možné bez přesných výrobních časů, cen strojní hodiny, cen materiálu a popisu strojního vybavení podniku.

## 8. Diskuze dosažených výsledků:

Hlavním úskalím řešení bylo definovat tvar kroužku a náběhů trnu a zápustky, tak aby byl kroužek správně otočen. Výsledné spočtené kovací síly vyhovují námi zvolenému strojnímu vybavení. Maximum bylo pro přechování 6,31 MN a pro otáčení 3,86 MN. Během samotné fáze otáčení byly silové nároky minimální. Síla se pohybovala mezi 0,1-0,3 MN. K nárůstu došlo až během dopřechování do zápustky. Program Qform měl problémy s kalkulací rychlosti deformace. V rozích společných pro zápustku a trn docházelo k vysokému nárůstu této hodnoty. Myslím, že v praxi by se tento jev neprojevil. Program měl jen problémy s výpočtem uzlů sítě v těchto místech. Hodnoty deformace se zdají být v pořádku a ukazují na příznivou situaci. Pohybovaly se mezi 0,8 – 1,6 po přechování a 1 – 2,6 po otáčení. Rozložení bylo rovnoměrné v celém průřezu, kromě již zmíněné spodní rohové části. Příznivé rozložení deformace pak bude mít vliv na zjemnění struktury materiálu. Během procesů nebyla překročena vrchní ani spodní hranice teploty stanovené pro tváření za tepla.

Hlavní nevýhodu navrhované technologie vidím v absenci přesně tvarované dráhy pro kužílky. Zajímavá je myšlenka kombinovat otáčení kroužků s válcováním obvodových kontur v otevřené zápustce nebo navrhnout jinou metodu tvarování dráhy. Například by mohl, po vytažení trnu, excentricky pracující válec s předdefinovanou konturou vytlačit do kroužku obvodovou dráhu. Produktivita výkovků na lisech společně s precizní strukturou řezu po doválcování do zápustky, by mohlo být jedním ze zajímavých řešení.

Technologie je vhodná pro malosériovou i velkosériovou výrobu. U malosériové výroby oceníme možnost použití méně nákladných univerzálních hydraulických lisů. Ty jsou díky jemné regulaci finálního tlaku šetrné k nástrojům a zásluhou možnosti akumulátorové nebo vlastní pohonné jednotky je možné lisy snáze sdružovat do linek a ušetřit na pořizovacích nákladech.

Pro každý tvar kroužku je nutné vyrobit speciální sadu nástrojů, a to nejen pro otáčení, ale i přechování a ostříhování. Pokud budeme kombinovat přechování s ostříhováním, můžeme ušetřit výrobní čas i materiál na nástroje. Výroba složitějších nástrojů bude náročnější a dražší na výrobu, ale také dražší na provoz. Další možností je zhotovit postupové zápustky sdružující celou technologii na jeden lis bez nutnosti výměny nástrojů nebo sestavení automatizované linky operující na několika lisech.

## Použité zdroje

- [1] ČADA, R.: *Technologie I. - Tváření a slévání*. Ostrava: VŠB, 2008. 180 s. ISBN 978-80-248-0795-9
- [2] LANFELD, P.: *Technologie tváření kovů*. [online]. Liberec, TUL, c2008, [cit 2012-30-02]. Dostupné z WWW:  
[http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce/01.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm)
- [3] RUSZ, S.: *Tváření - část I*. Ostrava: VŠB, 2003. 155 s. ISBN 80-248-0340-2
- [4] SVOBODA, P. a kol.: *Základy konstruování*. Brno: VUT, 2008. 234 s. ISBN 978-80-7204-584-6
- [5] SVOBODA, P. a kol.: *Výběry z norem pro konstrukční cvičení*. Brno: CERM, 2008. 222 s. ISBN 978-80-7204-534-1
- [6] PETRUŽELKA, J. a kol.: *Metody konečných prvků ve tváření za tepla*. Ostrava: VŠB, 1998. 194 s. ISBN 80-7078-636-1
- [7] BAŽANT, Zd. a kol.: *Anglicko-český technický slovník*. Brno: SNTL, 1992. 944 s. ISBN 80-03-00443-8
- [8] LEINVEBER, J., VÁVRA, P.: *Strojnické tabulky*. Úvaly: ALBRA, 2011. 926 s. ISBN 978-80-7361-081-4
- [9] STEVENS, D.: *Bearing failures and their causes*. [online]. Lancashire, c2011, [cit 2012-18-05]. Dostupné z WWW: <http://www.vibanalysis.co.uk/>
- [10] INA/FAG.: *Tapered rollers bearing*. [online]. Schaeffler CZ s.r.o., c2012, [cit 2012-18-05]. Dostupné z WWW:  
<http://fagtest.ina.com/content.schaeffler.cz/cs/mediathek/library/library-detail-language.jsp?id=3445063>
- [11] NTN-SNR.: *Ball and roller bearings*. [online] NTN corp., c2009, [cit 2012-18-05]. Cat.no.:2202-IX/E. Dostupné z WWW: <http://www.ntn-snr.com/portal/fr/en-en/index.cfm?page=/portal/home/documentation>
- [12] SEMIATIN, S. L.: *ASM Handbook Volume 14A: Bulk forming*. Ohio: ASM, 2005. 888 s. ISBN 0-87170-708-X
- [13] HRUBÝ, J.: *Metody technologického designu*. Ostrava: VŠB, 2003. 888 s. ISBN 80-248-0257-0
- [14] *QForm 2D/3D*, [počítačový program]. ver. 5.1.1.0621. Moscow (Russia): QuantorForm Ltd., [1998-2012]. Software simulující tváření.

- [15] HRUBÝ, J.: *Stříhání a přesné stříhání*. [online] Ostrava: VŠB, [cit 2012-18-05]. Dostupné z WWW: <http://www.345.vsb.cz/jirihruby/KTN/index.htm>
- [16] ŽĎAS a.s.: *Hydraulické univerzální lisy řady CTH* [online]. Žďár nad Sázavou, c2011, [cit 2012-18-05]. Dostupné z WWW: <http://www.zdas.cz/cs/content.aspx?id=45>
- [17] HANZEL, A., SPITTEL, T.: *Rasčet energosilovych parametrov v processach obrabotki metallov davleniem*. Moskva: METALLURGIA, 1982. 73 s.

**Seznam příloh:**

Příloha A.: Tabulka výrobního programu ložisek firmy NTN-SNR

Výkres 1. - Kuželíkové ložisko INA/FAG 3206 - x

Výkres 2: Vnější kroužek ložiska INA/FAG 32016 - x

Výkres 3. - Výkovek kroužku po otočení

Výkres 4. - Polotovary

Výkres 5. - Sestava nástrojů pro přechování

Výkres 6. - Sestava nástrojů pro kombinované prostřihování a ostřihování

Výkres 7. - Sestava nástrojů pro otáčení kroužků



Děkuji vedoucímu mé bakalářské práce, prof. Ing. Jiřímu Hrubému, CSc., za odborné vedení, poskytnutí cenných rad a pomoc při psaní této práce.

V Albrechticích dne: 20. 5. 2012